

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Optimización de la operatividad de arrecifes artificiales durante su vida útil

Autor: Juan Manuel Raffo Caballero

Tutor: Alejandro López Ruiz

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Optimización de la operatividad de arrecifes artificiales durante su vida útil

Autor:

Juan Manuel Raffo Caballero

Tutor:

Alejandro López Ruiz

Profesor Ayudante Doctor

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Máster: Optimización de la operatividad de arrecifes artificiales durante su vida útil

Autor: Juan Manuel Raffo Caballero
Tutor: Alejandro López Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Ahora que acaba una etapa de mi vida, la de estudiante, y comienza otra nueva aún más apasionante, quiero dedicar unas palabras a agradecer a todas las personas que han hecho posible que esté escribiendo este Trabajo Fin de Máster.

A todos los profesores que han pasado por las clases durante el Grado y el Máster, tanto a los buenos como a los malos, porque de todo se aprende.

Al tutor de este trabajo, Alejandro, por su gran dedicación y excelente desempeño como el mismo, guiándome y ayudándome siempre que lo he necesitado.

A mis compañeros de clase, por haber compartido juntos tantas horas, a los que les deseo una gran vida profesional. En especial, a Germán, Fran y Alejandra, mis 3 compañeros de fatiga en el máster, por formar un gran grupo de trabajo y haber hecho frente juntos a las adversidades.

A toda la familia Civile, por acoger y formar de la mejor manera posible a un inexperto muchacho recién horneado en la Universidad, tanto conmigo como con todos los alumnos y alumnas en prácticas que pasan por allí, contribuyendo a la formación de las nuevas generaciones de ingenieros. Le hacéis un gran favor a la profesión.

Muy en especial, a quienes me han aguantado y animado siempre al llegar a casa, Agustín, Pablo y Lara, el cuarto componente del piso. También a Alba y Ángela, por los cotilleos, las comidas y salidas todos juntos, y las que quedan por venir.

Por último, a mis padres y mi hermana, por criarme, apoyarme y hacer posible que hoy haya un ingeniero más suelto por el mundo.

*Juan Manuel Raffo Caballero
Sevilla, 2019*

Resumen

En los últimos años, la práctica del surf es un deporte en auge. Sin embargo, para que sea posible su práctica, se requieren unas condiciones especiales de oleaje, las cuales no satisfacen todas las playas. La surfeabilidad de un estado de mar depende de una serie de parámetros, entre los que se encuentran: altura de ola en rotura, peel angle, intensidad de rotura, tipo de rotura y longitud de cresta.

Sin embargo, existen unas estructuras, llamadas arrecifes artificiales, con las que se puede forzar que existan esas condiciones. De esta manera, con estas estructuras se conseguiría convertir playas no operativas para la práctica del surf en lugares en que sea posible el mismo, aumentando la operatividad de la zona en lo referente a la surfeabilidad del oleaje. En este tipo de estudios, se dice que una playa es operativa para la práctica del surf cuando el oleaje ha roto, y además con una altura de ola en rotura superior a 30 cm. Por tanto, si para forzar unas condiciones óptimas, habrá que buscar que se produzca rotura y con alturas de ola que no sean residuales.

En este Trabajo Fin de Máster, se pretende continuar con el trabajo realizado en el Trabajo Fin de Máster *Diseño y optimización de arrecifes artificiales para la práctica de surf*, realizado por José María Tortolero Jara, y dirigido por Alejandro López Ruiz. En dicho trabajo, se realizaba un análisis de la operatividad de un arrecife artificial en la playa de Conil de la Frontera. Para ello, se realizaron una serie de simulaciones bidimensionales con el modelo numérico SWAN, el cual realiza propagaciones espectrales de oleaje en grandes superficies. Sin embargo, este modelo no es óptimo para un estudio en dimensiones reducidas, como es el caso. Por ello, en este TFM se van a realizar simulaciones con el modelo numérico XBeach, más óptimo para este tipo de análisis. El objetivo general del trabajo es el análisis de la operatividad del arrecife a lo largo de su vida útil. Para ello, se realizarán unas simulaciones unidimensionales en unos perfiles de cálculo, distribuidos por el arrecife. Además, se van a realizar también unas simulaciones en el estado previo, es decir, sin arrecife, con el objetivo de evaluar el potencial aumento de la operatividad que se produciría con la construcción del arrecife. Por último, se realizarán simulaciones con vegetación, evaluando el efecto de disipación que produciría y su influencia en la surfeabilidad del oleaje.

Entre los resultados obtenidos, es destacable comentar que efectivamente, la presencia del arrecife produce un aumento de la operatividad del oleaje con respecto a la operatividad sin arrecife. Además, la vegetación incluida no tiene mucha influencia en la operatividad del arrecife ni en los parámetros de surf.

Abstract

Over the last years, surfing has become a rising sport. However, it requeries special wave conditions, which are not always satisfied. The ability of surfing a particular wave state depends on certain parameters, such as breaking height, peel angle, break intensity, breaking type and crest length.

Nevertheless, some structures, known as artificial reefs, are capable of forcing such conditions. That way, it is possible to turn on inoperative beaches into operational ones. It is agreed that an operational state is reached when breaking occurs and with a minimum wave height of 30 cm. Therefore, forcing optimum conditions to surfing requires producing wave braking and non residual wave heights.

This work pretends to continue with the work done in a previous Master Thesis called *Diseño y optimización de arrecifes artificiales para la práctica de surf*, by José María Tortolero Jara and advised by Alejandro López Ruiz. That work analysed the operability of an artificial reef located on a beach in Conil de la Frontera. To that end, some two-dimensional simulations were made with the numerical model *SWAN*. This model makes spectral wave propagations on great surfaces. However, this is not optimum for this case of study. Because of that, this work perform simulations with the numeric model *XBeach*, more enhanced for this type of analysis. The main goal of this project is to analyse the operability of the reef during its lifetime, performing some one-dimensional simulations in some computational profiles, allocated all along the reef. In addition, some previous state simulations (without reef) are made, in order to evaluate the potential rising of the operability with the reef construction. Finally, some simulations with vegetation are also made to analyse the disipation effect that it produces and its influence on the surf parameters. Among the results, it is remarkable that the existence of the reef rises the surfing operability of the beach. Also, the vegetation has not a big influence in the operability nor in surf parameters.

Índice Abreviado

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
1 Introducción	1
1.1 Estado del arte	1
1.2 Objetivos	1
2 Descripción del área de estudio	3
2.1 Emplazamiento	3
2.2 Batimetría	4
2.3 Caracterización de clima marítimo	5
3 Metodología	21
3.1 Downscaling de clima marítimo	21
3.2 Modelo numérico	22
3.3 XBeach	22
3.4 SWAN	26
3.5 Parámetros de surf	29
3.6 Perfiles de cálculo	31
3.7 Simulaciones	32
3.8 Criterio de rotura	35
3.9 Reconstrucción de la serie temporal completa	36
4 Simulaciones realizadas	37
4.1 Simulación inicial	37
4.2 Cambio de la geometría del arrecife	37
4.3 Simulaciones definitiva	41

5	Análisis de resultados	47
5.1	Simulación unidimensional (Con arrecife y sin vegetación)	47
5.2	Simulación unidimensional (Sin arrecife)	58
5.3	Simulación unidimensional con vegetación	63
5.4	Simulación bidimensional	73
6	Conclusiones y trabajo futuro	77
	<i>Índice de Figuras</i>	79
	<i>Bibliografía</i>	83

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
1 Introducción	1
1.1 Estado del arte	1
1.2 Objetivos	1
2 Descripción del área de estudio	3
2.1 Emplazamiento	3
2.2 Batimetría	4
2.3 Caracterización de clima marítimo	5
2.3.1 Introducción	5
2.3.2 Oleaje	6
Introducción	6
Descripción general en profundidades indefinidas	6
Régimen medio en profundidades indefinidas	10
Régimen extremal en profundidades indefinidas	11
Obtención de estados más frecuentes	13
2.3.3 Viento	13
Introducción	13
Descripción general en profundidades indefinidas	13
Régimen medio en profundidades indefinidas	15
Régimen extremal en profundidades indefinidas	17
2.3.4 Variaciones del nivel del mar	19
3 Metodología	21
3.1 Downscaling de clima marítimo	21
3.2 Modelo numérico	22
3.3 XBeach	22
3.3.1 Introducción	22
3.3.2 Ecuaciones de gobierno	22
Acción de onda corta	22
Ecuaciones en profundidades reducidas	25
3.4 SWAN	26

3.4.1	Ecuaciones de gobierno	26
	Descripción espectral del oleaje	26
	Propagación del oleaje	28
3.5	Parámetros de surf	29
3.6	Perfiles de cálculo	31
3.7	Simulaciones	32
3.8	Criterio de rotura	35
3.9	Reconstrucción de la serie temporal completa	36
4	Simulaciones realizadas	37
4.1	Simulación inicial	37
4.2	Cambio de la geometría del arrecife	37
4.3	Simulaciones definitiva	41
4.3.1	Simulación unidimensional	41
4.3.2	Simulación estado previo	44
4.3.3	Simulación bidimensional	44
5	Análisis de resultados	47
5.1	Simulación unidimensional (Con arrecife y sin vegetación)	47
5.1.1	Porcentaje de rotura	47
5.1.2	Altura de ola en rotura	47
5.1.3	Peel angle	49
5.1.4	Intensidad de rotura	52
5.1.5	Operatividad	54
5.2	Simulación unidimensional (Sin arrecife)	58
5.2.1	Porcentaje de rotura	58
5.2.2	Altura de ola en rotura	59
5.2.3	Peel angle	59
5.2.4	Intensidad de rotura	61
5.2.5	Operatividad	63
5.3	Simulación unidimensional con vegetación	63
5.3.1	Porcentaje de rotura	64
5.3.2	Altura de ola en rotura	65
5.3.3	Peel angle	67
5.3.4	Intensidad de rotura	69
5.3.5	Operatividad	72
5.4	Simulación bidimensional	73
6	Conclusiones y trabajo futuro	77
	<i>Índice de Figuras</i>	79
	<i>Bibliografía</i>	83

1 Introducción

En los últimos años, la práctica del surf se ha convertido en un deporte en auge. Sin embargo, se requiere un oleaje con unas características especiales para que sea posible la práctica del mismo, unas condiciones que no satisfacen todas las playas.

Sin embargo, existen unas estructuras capaces de favorecer la aparición de un oleaje de estas características, y son llamadas arrecifes artificiales. Este tipo de estructuras tienen muchos usos: defensa de la costa, fomento de actividades deportivas, fines pesqueros (preservación e incremento de los recursos pesqueros litorales) y recuperación y mejora de la biodiversidad de ecosistemas degradados. En España, la mayor parte de los arrecifes artificiales instalados están destinados a fines pesqueros ¹. En Andalucía se sitúan dos polígonos de arrecifes artificiales con fines pesqueros, uno de ellos situado en el Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar (Almería), y otro en el Paraje Natural de los Acantilados de Maro-Gordo (Granada-Málaga) ². Este trabajo se centrará en el estudio y análisis de un arrecife artificial para la práctica de surf.

1.1 Estado del arte

Hay un gran número de artículos publicados sobre la construcción, diseño y modelización de los arrecifes artificiales. En un principio, estos se centraban en la evaluación de la surfabilidad de las olas [10][19] en función de unos parámetros de surf [20][8]. Posteriormente, se empezaron a realizar distintos diseños de arrecifes, no sólo para mejorar la surfabilidad de las olas, sino también con fines de protección costera [16][3][15]. En ellos se realizaba un análisis del comportamiento del arrecife frente a varios estados de mar frecuentes. Por último, también se han realizado diseño y análisis de arrecifes durante su vida útil [12] utilizando datos históricos.

1.2 Objetivos

Este trabajo es una continuación del Trabajo Fin de Máster "Diseño y optimización de arrecifes artificiales para la práctica de surf", realizado por el alumno José María Tortolero Jara, y tutorizado por Alejandro López Ruiz, de la Universidad de Sevilla. En dicho trabajo

¹ Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica

² Fuente: Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible

se realizaba el diseño de dos arrecifes con diferentes ángulos de abertura, 66° y 45°, en Conil de la Frontera (Cádiz), con el fin de evaluar su viabilidad e impacto en la surfeabilidad. Este trabajo utilizaba el modelo numérico SWAN integrado en Delft3D. Entre los resultados obtenidos se obtuvo que la operatividad en el arrecife aumentaba un 50 % con respecto al estado previo, siendo más óptimo el arrecife de 45° de abertura.

En el presente trabajo se pretende realizar un análisis del arrecife de 45° con el modelo numérico XBeach, siendo un modelo más preciso en áreas reducidas y que modela mejor la rotura del oleaje que SWAN, que es un modelo más óptimo para la propagación del oleaje en grandes superficies. Para ello se van a seguir una serie de objetivos específicos:

- Propagación del oleaje en perfiles 1D del arrecife con el modelo numérico
- Cálculo de parámetros de surf
- Posterior comparación con modelo en 2D
- Cálculo en 1D en el estado previo, sin la presencia del arrecife, para evaluar el aumento de la operatividad que se produce por la construcción del arrecife
- Cálculo en 1D con vegetación, teniendo en cuenta la disipación que produce

2 Descripción del área de estudio

En este capítulo se procede a realizar una descripción del área en que se enmarca el estudio desde el punto de vista tanto morfológico como del clima marítimo.

2.1 Emplazamiento

El arrecife se sitúa en la playa de Conil de la Frontera, en la provincia de Cádiz (España). Con un área de 87 km^2 y una población de 22 427 habitantes¹, cuenta con unos 14 km de costa, lo que la convierte en un gran atractivo turístico, multiplicando su población prácticamente por 4 en la época estival. Una de las principales actividades de ocio desarrolladas durante esta época es la práctica del surf, lo que la convierte en una localización idónea para este estudio.

¹ Datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), 2018



Figura 2.1 Situación de la zona de estudio.

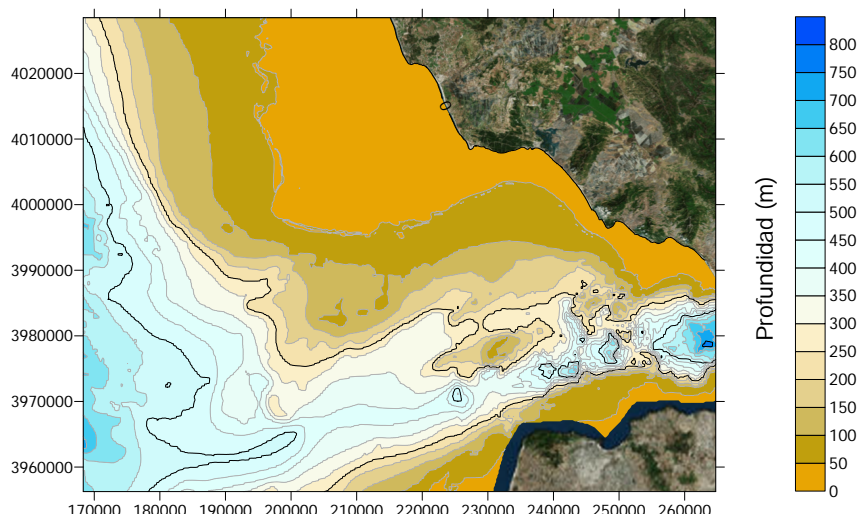


Figura 2.2 Batimetría de la zona de estudio (I).

2.2 Batimetría

El uso de una batimetría lo suficientemente precisa y realista es fundamental para la obtención de unos resultados fiables, debido a que los procesos de propagación dependen en gran medida del fondo. En este trabajo se ha utilizado la misma batimetría utilizada en el Trabajo Fin de Máster de referencia [12]. Esta se compone de:

- Batimetría lejana: engloba desde aguas indefinidas hasta aguas costeras. No requiere de un alto grado de precisión, debido a que el efecto del fondo en la propagación del oleaje en aguas profundas es despreciable. Procede de EMODnet (European Marine Observation and Data Network), servicio que dispone de datos batimétricos en toda Europa.
- Batimetría cercana: batimetría en aguas costeras. Es fundamental que tenga un alto nivel de detalle, pues tiene un alto grado de influencia en la propagación del oleaje. Se ha obtenido de una ecocartografía realizada por el Ministerio de Fomento en el litoral de la costa de Cádiz en 2012.
- Topografía de las zonas costeras: se requiere disponer de esta información en una pequeña zona costera para garantizar continuidad en la interpolación de la profundidad. Obtenida del DERA (Servicio de Datos Espaciales de Referencia de Andalucía).

En las Figuras 2.2 y 2.3 se muestra la batimetría utilizada de la zona de estudio.

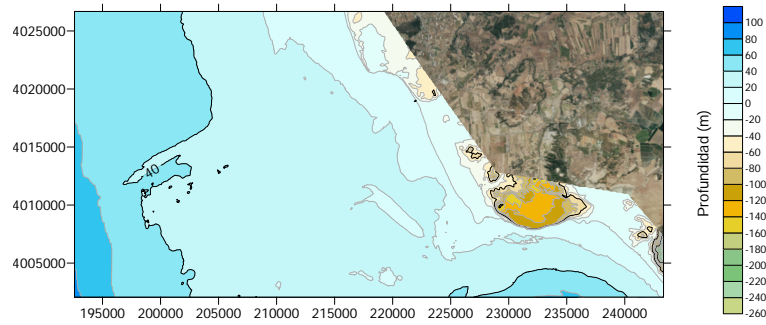


Figura 2.3 Batimetría de la zona de estudio (II).

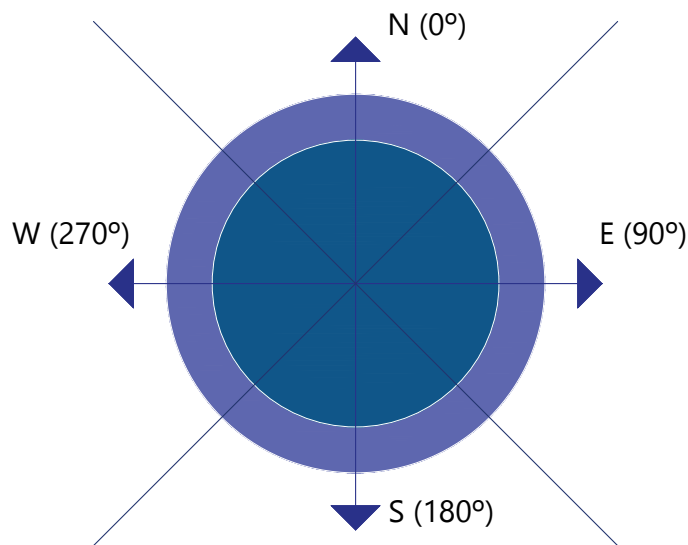


Figura 2.4 Criterio del sistema de direcciones de oleaje.

2.3 Caracterización de clima marítimo

2.3.1 Introducción

En esta sección se estudian los principales agentes climáticos que influyen en el comportamiento hidrodinámico del entorno del arrecife, oleaje y viento (en régimen medio y extremal) así como las variaciones del nivel del mar. El análisis realizado incluirá:

- Descripción general del oleaje y viento en profundidades indefinidas
- Régimen medio de oleaje y viento
- Régimen extremal de oleaje y viento
- Análisis de armónicos de marea

Es importante comentar que cuando se habla de direcciones en lo referente a clima marítimo, son direcciones de **procedencia** del oleaje, en un sistema de referencia náutico, tal y como se muestra en la Figura 2.4.

2.3.2 Oleaje

Introducción

En el Golfo de Cádiz se encuentra la boya de Puertos del Estado "Boya del Golfo de Cádiz", situada a 450 md de profundidad en las coordenadas 6.96° W 36.48° N, con un gran volumen de dato y frecuencia de muestreo excelente. Sin embargo, dada la lejanía de la misma con la zona de estudio se han utilizado los datos de un punto SIMAR cercano. Concretamente se han utilizado los datos del SIMAR 5034009 (6.67° W; 36.00° N) (Figura 2.5).

El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza. Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR-44 y WANA. El conjunto SIMAR ofrece datos de oleaje con frecuencia horaria desde el año 1958 hasta la actualidad y están disponibles tanto en el Mar Mediterráneo como en el Océano Atlántico, en aguas abiertas como en costa, llegando a ofrecer datos a escala portuaria. Esos puntos proveen datos sobre:

- Hm0: Altura significativa espectral
- Tm02: Período medio espectral momentos 0 y 2
- Tp: Período de pico
- DirM: Dirección media de procedencia de oleaje (0° N, 90° E)
- Hm0V : Mar de viento: Altura Significante Espectral
- DirMV : Mar de Viento: Dirección Media de procedencia
- Hm0F1 : Mar de Fondo 1: Altura Significante Espectral
- Tm02F1: Mar de Fondo 1: Periodo Medio Espectral
- DirMF1: Mar de Fondo 1: Dirección Media de procedencia
- Hm0F2 : Mar de Fondo 2: Hm0
- Tm02F2: Mar de Fondo 2: Periodo Medio Espectral
- DirMF2: Mar de Fondo 2: Dirección Media de procedencia
- VelV : Velocidad Media del Viento
- DirV : Dirección Media de procedencia del Viento

Descripción general en profundidades indefinidas

En primer lugar se va a realizar una descripción de las características del oleaje en la zona de estudio.

En la zona se produce un fuerte predominio de los oleajes procedentes del W, así como de aquellos procedentes del WNW, pudiéndose observar en la rosa de oleajes obtenida (Figura 2.6). Además, en la rosa se puede apreciar de forma rápida cuáles son las alturas de ola más frecuentes para cada dirección de oleaje.

Se ha representado un diagrama de la altura de ola durante todo el período en el que existen datos (1958-2016) (Figura 2.7).



Figura 2.5 Situación del punto SIMAR.

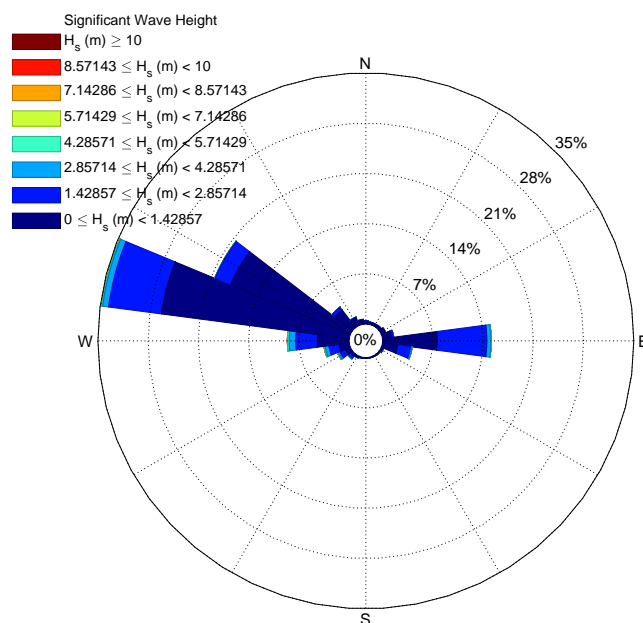


Figura 2.6 Rosa de oleaje.

Además, se han calculado los histogramas de alturas de ola y períodos de pico (Figuras 2.8 y 2.9). Se observa claramente cómo las alturas de ola más frecuentes se encuentran entre 0.5 y 1 m, mientras que los períodos de pico más frecuentes se encuentran entre los 4 y 6 seg.

En la Figura 2.10 se muestra una gráfica de dispersión de la altura de ola frente al período de pico. Además, en la Figura 2.11 se muestra una gráfica de dispersión de la altura de ola

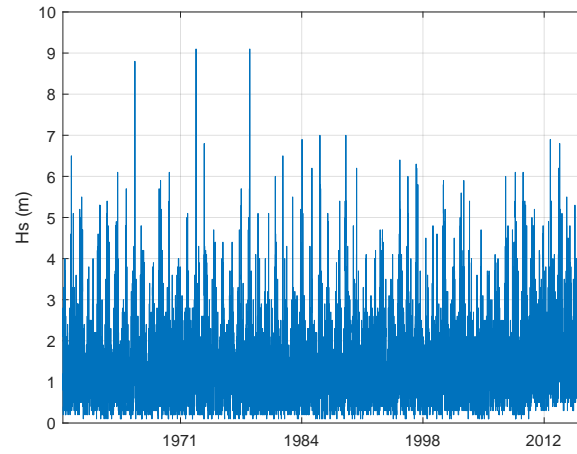


Figura 2.7 Serie temporal de altura de ola significativa.

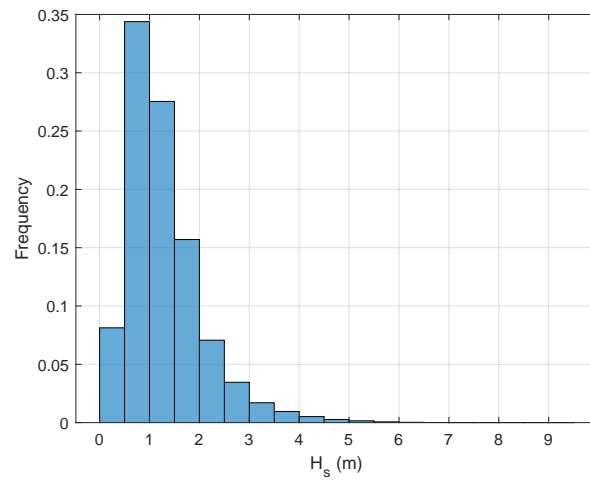


Figura 2.8 Histograma de altura de ola.

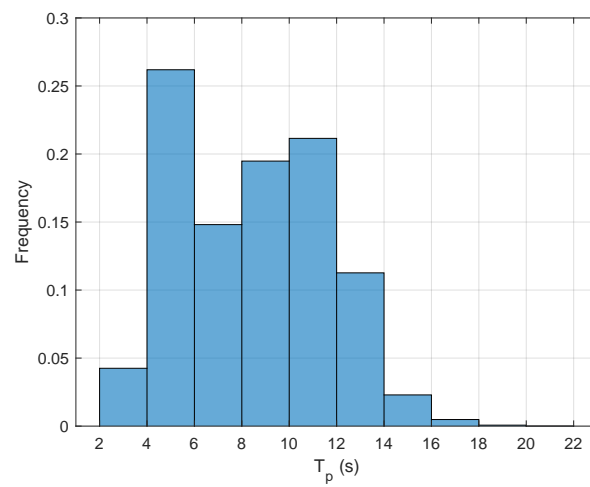


Figura 2.9 Histograma de período de pico.

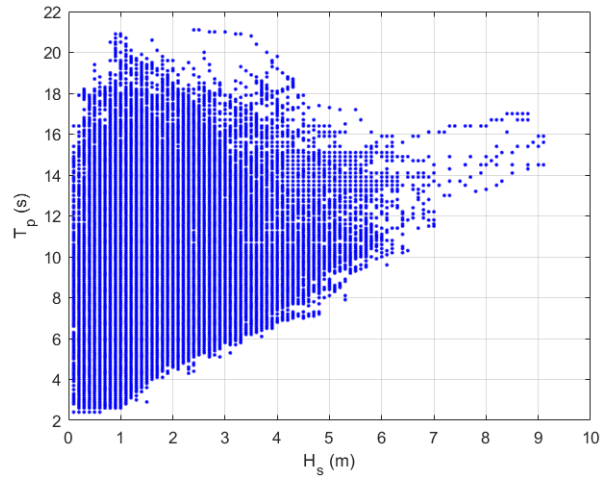


Figura 2.10 Dispersión $H_s - T_p$.

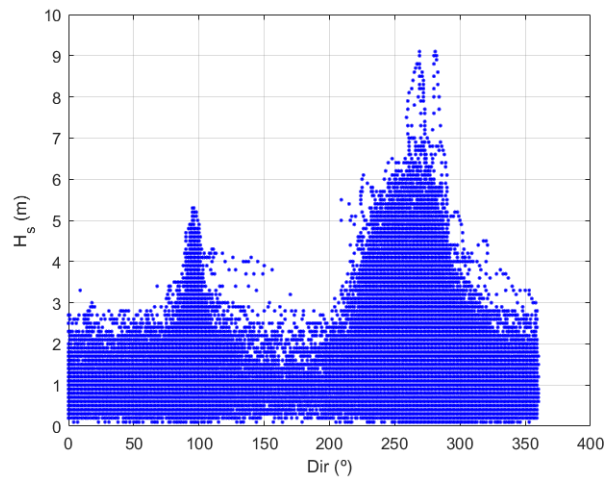


Figura 2.11 Dispersión H_s -Dirección.

frente a la dirección de procedencia del oleaje. En esta imagen se puede observar claramente las direcciones dominantes del oleaje.

Resumen de resultados

Los resultados más reseñables de la descripción general del oleaje en profundidades indefinidas son:

- Rango de alturas de ola entre 0 y 9.1 m
- Las alturas de ola más frecuentes están entre 0.5 y 1 m
- Rango de períodos de pico entre 2.4 y 21.1 seg
- Los períodos de pico más frecuentes están entre 4 y 6 seg
- Las direcciones más frecuentes de oleaje son W y WNW

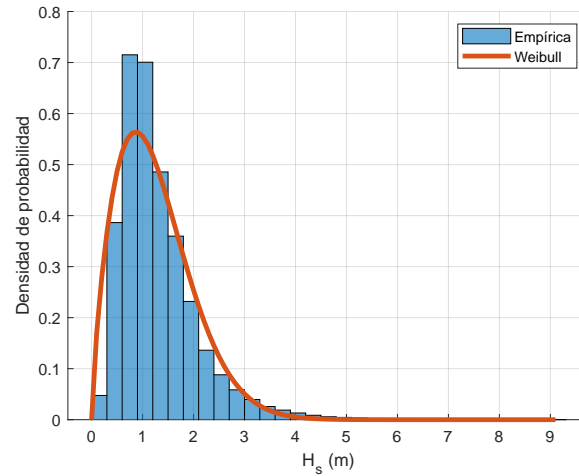


Figura 2.12 Función de densidad tipo Weibull para el régimen medio de altura de ola.

Régimen medio en profundidades indefinidas

Se obtiene el régimen medio del oleaje en profundidades indefinidas para la "Altura de ola significativa H_s (m)" considerando todas las direcciones.

Todos los regímenes medios de altura de ola significativa se ajustan a una distribución de probabilidad tipo Weibull cuya función de densidad viene representada por:

$$y = f(x|a,b) = ba^{-b}x^{b-1}e^{-(x/a)^b}I_{(0,\infty)}(x) \quad (2.1)$$

Los parámetros a y b de la distribución weibull ajustados se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Régimen medio: Parámetros distribución Weibull.

Parámetros:	a	b
	1.4049	1.7493

Una vez conocidos estos parámetros se calculan las funciones de densidad y distribución de probabilidad. En la Figura 2.12 se representa el histograma de frecuencias (datos reales) junto a la función de densidad de los datos ajustados según una distribución tipo Weibull. Esta gráfica permite conocer la probabilidad de ocurrencia de cada altura de ola. En la Figura 2.13 se encuentra representado el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que indica la probabilidad de no excedencia de cada altura de ola.

Resumen de resultados

Como resumen del régimen medio para la altura de ola se presenta la Tabla 2.2.

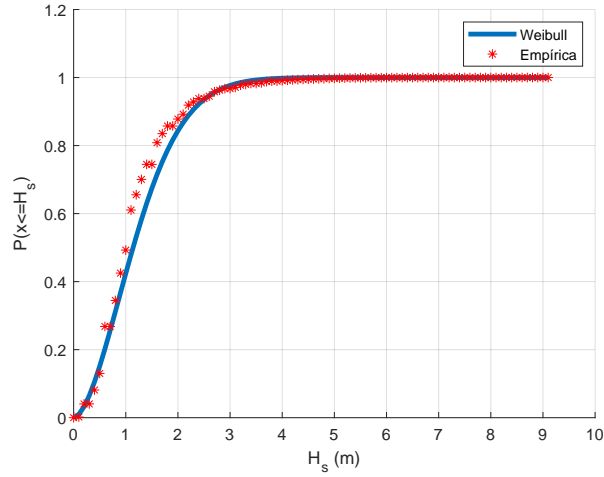


Figura 2.13 Función de distribución tipo Weibull para el régimen medio de altura de ola.

Tabla 2.2 Resumen de régimen medio.

Prob. No excedencia	H_s (m)
50 %	1.2
80 %	1.9
99 %	3.4

Régimen extremal en profundidades indefinidas

Para la obtención del régimen extremal se ha usado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold). Para ello se ha fijado la altura de ola umbral en 3.4 m, correspondiente al valor que es superado en menos del 1 %, que es el valor que tiene una probabilidad de no excedencia de un 99 % en la distribución Weibull. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración mínima entre temporales debe ser superior a 48 h. De esta manera se han obtenido 396 eventos extremales en los años analizados.

Para caracterizar el régimen de picos sobre umbral, se utiliza la distribución de Valores Extremos Generalizada (GEV) representativa del régimen. La forma general de la distribución utilizada es:

$$y = f(x|k, \mu, \sigma) = (1/\sigma) \exp \left(- \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/k} \right) \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1-1/k} \quad (2.2)$$

En la Tabla 2.3 se muestran los parámetros de ajuste del régimen extremal obtenidos según la GEV. Una vez conocidos estos parámetros se calculan las funciones de densidad y distribución de probabilidad. En la Figura 2.15 se representa el histograma de frecuencias (datos reales) junto con la función de densidad de los datos ajustados según una distribución GEV. En la Figura 2.16 se encuentra representado el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que indica la probabilidad de no excedencia de cada

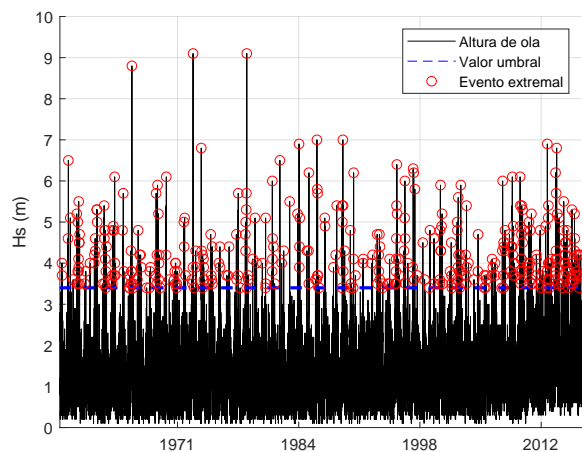


Figura 2.14 Picos de altura de ola sobre umbral con $H_{su} = 3.4m$.

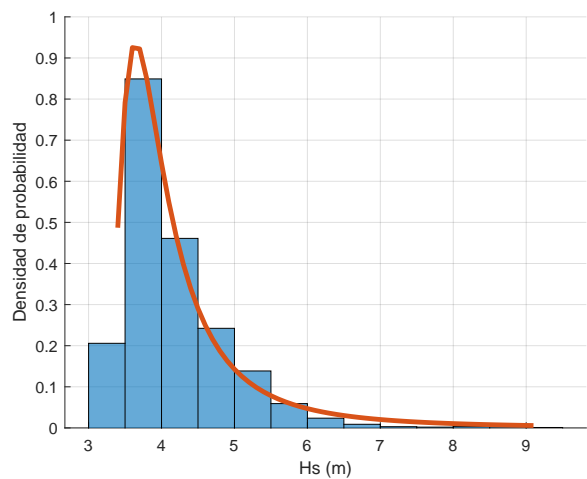


Figura 2.15 Función de densidad tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola.

altura de ola.

Tabla 2.3 Régimen extremal: Parámetros distribución GEV.

k	σ	μ	Número de eventos
0.4709	0.4326	3.7969	396

Resumen de resultados

Como resumen del régimen extremal para la altura de ola se presenta la Tabla 2.4.

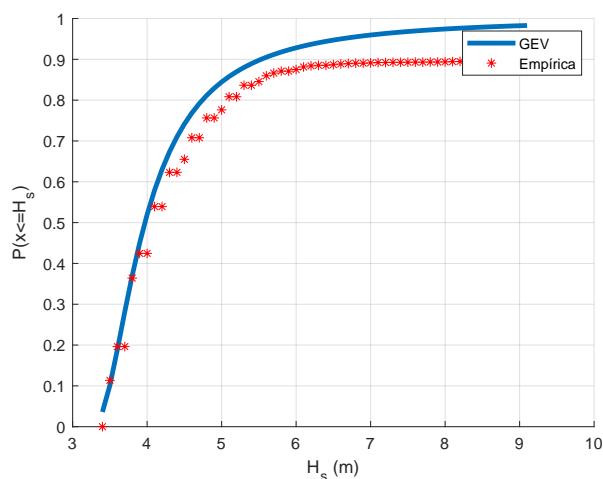


Figura 2.16 Función de distribución tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola.

Tabla 2.4 Resumen de régimen extremal.

Prob. No excedencia	H_s (m)
50 %	4
80 %	4.8
99 %	9.1

Obtención de estados más frecuentes

Por último, se han obtenido los estados de mar más frecuentes de todo el período, con el fin de utilizarlos en posteriores análisis. Los 4 estados más frecuentes se muestran en la Tabla 2.5, así como el correspondiente al percentil 90.

Tabla 2.5 Resumen de régimen extremal.

Estado	H_s (m)	T_p (s)	Dir (°)
1	0.7	3.5	276
2	0.8	3.8	274
3	0.6	3.5	277
4	0.9	3.9	272
5 (percentil 90)	1.9	5.5	126

2.3.3 Viento

Introducción

En cuanto al viento, los datos históricos son igualmente procedentes del SIMAR 5034009 2.5.

Descripción general en profundidades indefinidas

En primer lugar se va a realizar una descripción de las características del viento en la zona de estudio.

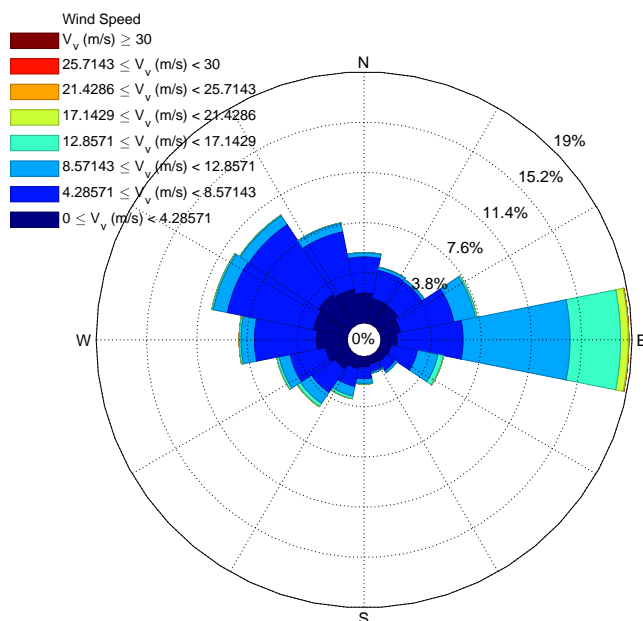


Figura 2.17 Rosa de viento.

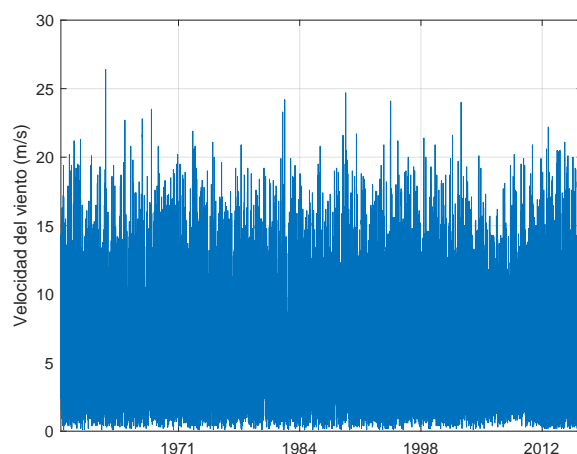


Figura 2.18 Serie temporal de velocidad del viento.

En la zona se produce un fuerte predominio de los vientos procedentes del E, así como de aquellos procedentes del WNW, pudiéndose observar en la rosa de viento obtenida (Figura 2.17). Además, en la rosa se puede apreciar de forma rápida cuáles son las velocidades de viento más frecuentes para cada dirección.

Se ha representado un diagrama de la velocidad del viento durante todo el período en el que existen datos (1958-2016) (Figura 2.18).

Además, se han calculado el histograma de velocidad del viento (Figura 2.19). Se observa claramente cómo las velocidades de viento más frecuentes se encuentran entre 4 y 6 m/s.

En la Figura 2.20 se muestra una gráfica de dispersión de la velocidad del viento frente a

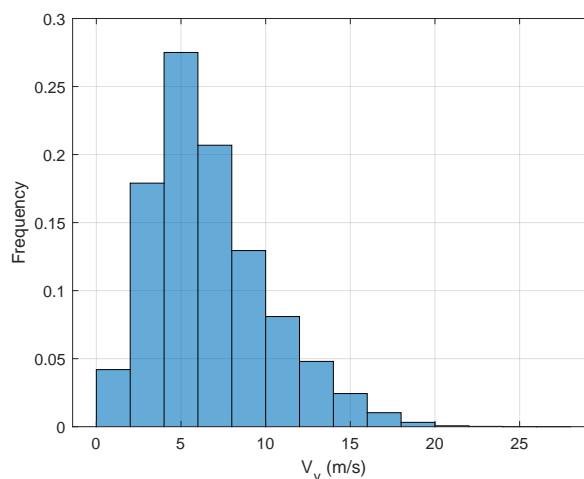


Figura 2.19 Histograma de velocidad del viento.

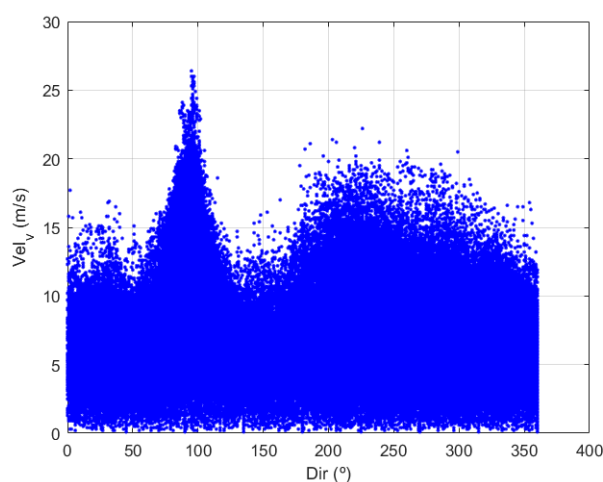


Figura 2.20 Dispersión Velocidad-Dirección.

la dirección de procedencia del mismo. En esta imagen se puede observar claramente las direcciones dominantes del viento.

Resumen de resultados

Los resultados más reseñables de la descripción general del viento en profundidades indefinidas son:

- Rango de velocidades del viento entre 0 y 26.4 m/s
- Las velocidades del viento más frecuentes están entre 4 y 6 m/s
- Las direcciones más frecuentes de oleaje son E y WNW

Régimen medio en profundidades indefinidas

Se obtiene el régimen medio del viento en profundidades indefinidas para la "Velocidad del viento (m/s)" considerando todas las direcciones.

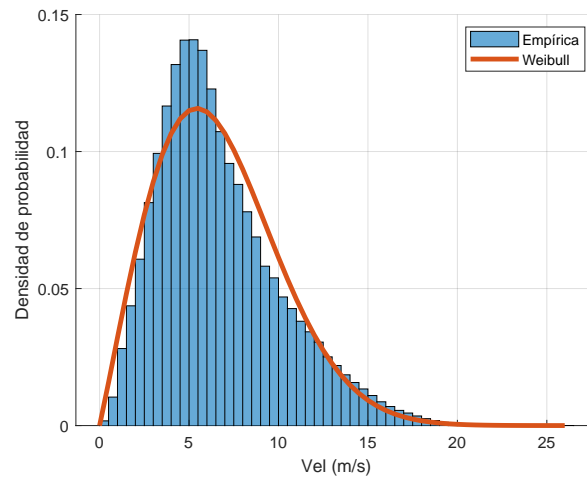


Figura 2.21 Función de densidad tipo Weibull para el régimen medio de velocidad del viento.

El régimen medio se ajusta a una distribución de probabilidad tipo Weibull cuya función de densidad viene representada por:

$$y = f(x|a,b) = ba^{-b}x^{b-1}e^{-(x/a)^b}I_{(0,\infty)}(x) \quad (2.3)$$

Los parámetros a y b de la distribución weibull ajustados se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Régimen medio: Parámetros distribución Weibull.

Parámetros:	a	b
	7.5326	2.0507

Una vez conocidos estos parámetros se calculan las funciones de densidad y distribución de probabilidad. En la Figura 2.21 se representa el histograma de frecuencias (datos reales) junto a la función de densidad de los datos ajustados según una distribución tipo Weibull. Esta gráfica permite conocer la probabilidad de ocurrencia de cada altura de ola. En la Figura 2.22 se encuentra representado el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que indica la probabilidad de no excedencia de cada velocidad del viento.

Resumen de resultados

Como resumen del régimen medio para la velocidad del viento se presenta la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Resumen de régimen medio.

Prob. No excedencia	Vel (m/s)
50 %	6.5
80 %	9.5
99 %	16

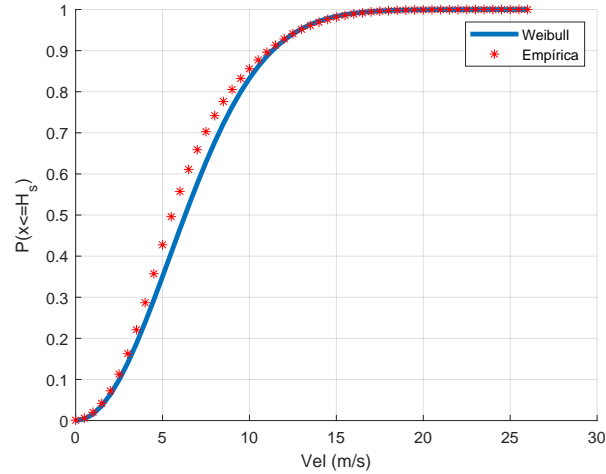


Figura 2.22 Función de distribución tipo Weibull para el régimen medio de velocidad del viento.

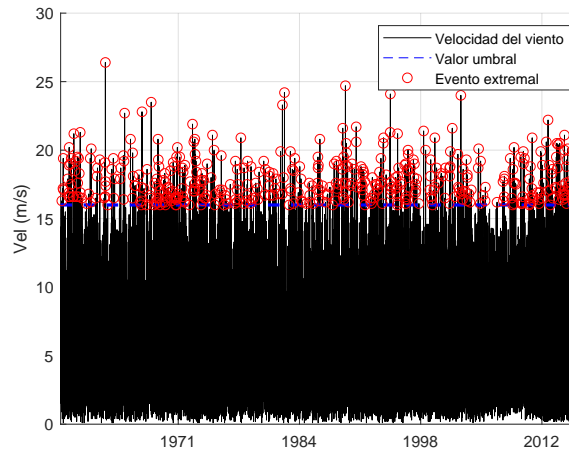


Figura 2.23 Picos de velocidad del viento sobre umbral con $Vel_u = 16 \text{ m/s}$.

Régimen extremal en profundidades indefinidas

Para la obtención del régimen extremal se ha usado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold). Para ello se ha fijado la velocidad umbral en 16 m/s , correspondiente al valor que es superado en menos del 1% , que es el valor que tiene una probabilidad de no excedencia de un 99% en la distribución Weibull. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración mínima entre temporales debe ser superior a 48 h . De esta manera se han obtenido 70 eventos extremales en los 11 años analizados.

Para caracterizar el régimen de picos sobre umbral, se utiliza la distribución de Valores Extremos Generalizada (GEV) representativa del régimen. La forma general de la distribución

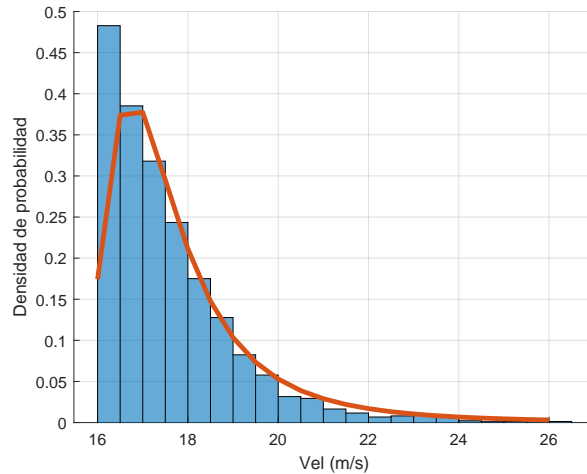


Figura 2.24 Función de densidad tipo GEV para el régimen extremal de velocidad del viento.

utilizada es:

$$y = f(x|k, \mu, \sigma) = (1/\sigma) \exp \left(- \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/k} \right) \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1-1/k} \quad (2.4)$$

En la Tabla 2.8 se muestran los parámetros de ajuste del régimen extremal obtenidos según la GEV. Una vez conocidos estos parámetros se calculan las funciones de densidad y distribución de probabilidad. En la Figura 2.24 se representa el histograma de frecuencias (datos reales) junto con la función de densidad de los datos ajustados según una distribución GEV. En la Figura 2.25 se encuentra representado el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que indica la probabilidad de no excedencia de cada velocidad del viento.

Tabla 2.8 Régimen extremal: Parámetros distribución GEV.

k	σ	μ	Número de eventos
0.2976	0.9694	16.9832	469

Resumen de resultados

Como resumen del régimen extremal para la altura de ola se presenta la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Resumen de régimen extremal.

Prob. No excedencia	Vel (m/s)
50 %	17.5
80 %	19
99 %	26.4

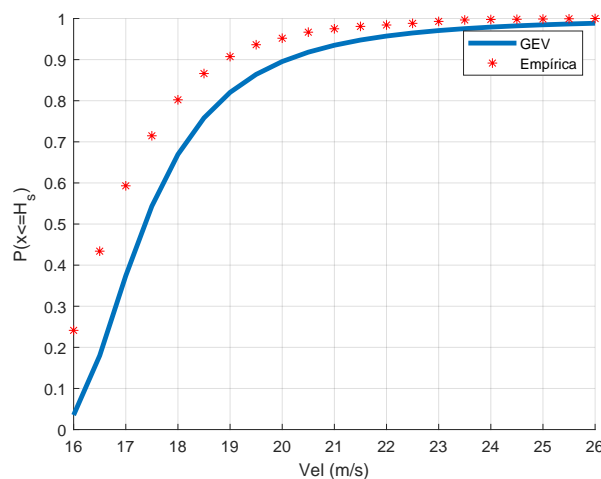


Figura 2.25 Función de distribución tipo GEV para el régimen extremal de velocidad del tiempo.

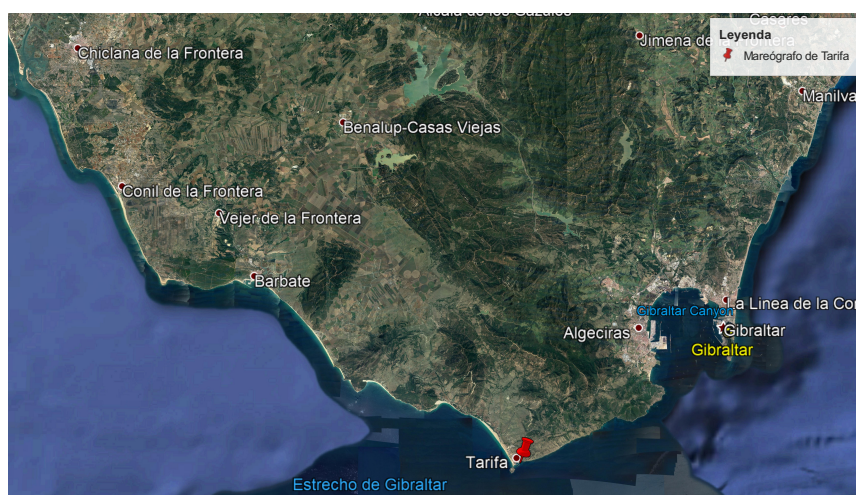


Figura 2.26 Situación del punto REDMAR.

2.3.4 Variaciones del nivel del mar

Para el análisis de las variaciones del nivel del mar se han utilizado los datos del mareógrafo de Tarifa, perteneciente a la Red de Mareógrafos de Puertos del estado (REDMAR), siendo la estación nº 3540 (5.6° W; 36.01° N), que toma mediciones con una cadencia de 1 minuto (Figura 2.26), y dispone de datos desde 1991.

La marea tiene una elevada importancia en la propagación del oleaje, siendo fundamental su inclusión en el estudio. Las distintas componentes de la marea son:

- Marea astronómica: es la producida por el efecto de los campos gravitatorios de la Luna, el Sol y la rotación de la Tierra
- Marea meteorológica: es la producida por los agentes atmosféricos como el viento y la variación de la presión atmosférica

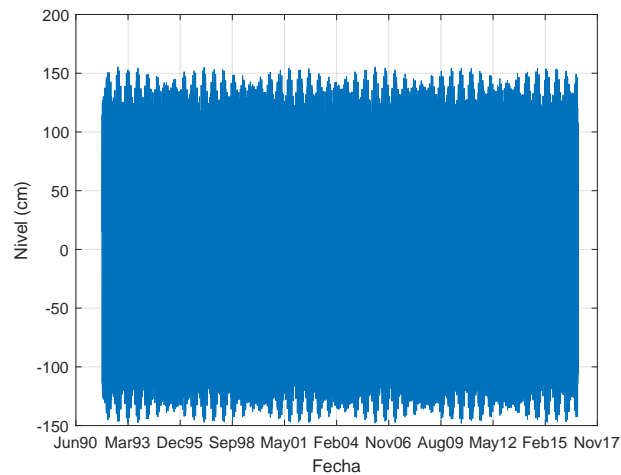


Figura 2.27 Serie temporal de niveles de marea.

- Variaciones a largo plazo: dada la escala del presente estudio, no se tienen en cuenta las variaciones del nivel del mar a largo plazo

En la Figura 2.27 se muestra la evolución del nivel a lo largo de todo el período de datos. En la Tabla 2.10 se muestran los armónicos de marea obtenidos.

Tabla 2.10 Armónicos de marea en el mareógrafo de Tarifa.

Armónico	Amplitud (m)	Fase
M2	0.4334	61.12
S2	0.1716	82.94
N2	0.0976	42.70
K2	0.0457	77.58
K1	0.0292	98.40
O1	0.0089	337.08
P1	0.0085	92.15

Además, la carrera de marea en la zona de estudio es de 186.9 cm [12].

3 Metodología

A lo largo de este capítulo se va a realizar una descripción de la metodología seguida para la realización del trabajo, así como de los parámetros de surf estudiados.

3.1 Downscaling de clima marítimo

¹ El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento del arrecife durante su vida útil. Para el análisis se han utilizado datos del SIMAR 6024024 (Figura 2.5), que tiene datos históricos de estados de mar con frecuencia horaria desde 2005, por lo que tendremos unos 89 012 estados de mar. Sin embargo, dado que correr tal cantidad de estados de mar tendría un coste computacional demasiado elevado, se va a simular una base de datos representativa, que incluye tanto regímenes medios y extremos, de 500 estados de mar, generada mediante la metodología de Downscaling. Posteriormente se realizará una interpolación para disponer de los resultados obtenidos durante toda la serie de datos.

La metodología de Downscaling utiliza el algoritmo de máxima disimilitud (MDA) [13], cuyo objetivo es seleccionar un número M de datos representativos de una base de datos de N datos. La selección comienza inicializando el subconjunto transfiriendo un vector inicial de la base de datos. Este vector inicial es el que tenga la mayor suma de disimilitudes relativas a los otros dentro de la base de datos. El resto de los M-1 elementos se seleccionan de manera iterativa, calculando la disimilitud entre cada dato restante en la base de datos y los elementos del subconjunto y transfiriendo el más disimilar al subconjunto. El proceso acaba cuando el algoritmo alcanza M iteraciones. Por ejemplo, si el subconjunto está formado por R vectores ($R \leq M$), la disimilitud entre el vector i de la base de datos N-R y el vector j perteneciente al subconjunto R se calcula como:

$$d_{ij} = ||x_i - v_j|| \quad i = 1, \dots, N - R \quad j = 1, \dots, R \quad (3.1)$$

Por tanto, la disimilitud entre el vector i y el subconjunto R se calcula como:

$$d_{i,sub} = \min(||x_i - v_j||) \quad i = 1 \dots N - R \quad j = 1 \dots R \quad (3.2)$$

¹ La descripción del downscaling se ha obtenido de [4].

Una vez que se han calculado las N-R disimilitudes, el siguiente dato seleccionada es el que tenga mayor valor de $d_{i,sub}$. [5]

3.2 Modelo numérico

En cuanto al modelo numérico utilizado, para las simulaciones realizadas en el entorno del arrecife se ha utilizado XBeach, como ya se ha comentado. Sin embargo, para la obtención de las condiciones de contorno también se ha utilizado SWAN, realizándose un acoplamiento entre ambos modelos, utilizándose cada uno donde mejor actúa, es decir, SWAN para realizar una propagación desde profundidades indefinidas hacia la zona del arrecife, y XBeach para las simulaciones más detalladas en los perfiles de computación. En apartados posteriores se procede a explicar los mismos.

3.3 XBeach

Toda la información mostrada en esta sección se ha extraído del manual de xbeach [2].

3.3.1 Introducción

El modelo numérico utilizado es XBeach, desarrollado por Deltares, la Universidad de Delft y la Universidad de Miami. Este es un modelo unidimensional y bidimensional que originalmente fue desarrollado para simular procesos hidrodinámicos y morfodinámicos e impactos en playas de arena con un dominio a escala kilométrica y una escala temporal de tormentas. El modelo incluye los procesos de transformación de onda corta (refracción, shoaling y rotura), transformación de onda larga (generación, propagación y disipación), variación del nivel producida por el oleaje y corrientes no estacionarias, así como overwash y inundación. También simula procesos de transporte de sedimentos, actualización de fondo y efectos de la vegetación y otras estructuras. Además, cuenta con dos modos de simulación. El utilizado para el análisis, el modo hidrostático, en el que la variación de la amplitud de onda se resuelve de manera independiente a las ondas largas, corrientes y cambio morfológico, con bajo coste computacional. El otro modo es el no hidrostático, en el que se resuelven todos los procesos incluyendo los movimientos de onda corta, con mayor coste computacional.

3.3.2 Ecuaciones de gobierno

Acción de onda corta

Ecuaciones de equilibrio

El forzamiento del oleaje en la ecuación de equilibrio de momentos en aguas someras se obtiene de una versión dependiente del tiempo de la ecuación de equilibrio de acción de onda. En esta ecuación se tiene la distribución direccional de la acción, donde el espectro de frecuencias es representado por una frecuencia, siendo este el parámetro espectral $f_{m-1,0}$.

La ecuación de equilibrio es:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_{gx}A}{\partial x} + \frac{\partial c_{gy}A}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta}A}{\partial \theta} = -\frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma} \quad (3.3)$$

En la cual la acción del oleaje A se calcula como:

$$A(x,y,t,\theta) = \frac{S_w(x,y,t,\theta)}{\sigma(x,y,t)} \quad (3.4)$$

donde θ representa el ángulo de incidencia del oleaje, S_w representa la densidad de energía del oleaje en cada bloque direccional y σ la frecuencia intrínseca del oleaje. Tanto ésta como la celeridad de grupo se obtiene de la ecuación de dispersión. D_w , D_f y D_v son términos de disipación por oleaje, fricción con el fondo y vegetación, respectivamente. La frecuencia intrínseca se obtiene con:

$$\sigma = \sqrt{g\kappa \tanh \kappa h} \quad (3.5)$$

La celeridad de la onda se calculan como:

$$c_{gx}(x,y,t,\theta) = c_g \cos(\theta) \quad (3.6)$$

$$c_{gy}(x,y,t,\theta) = c_g \sin \theta \quad (3.7)$$

$$c_{\theta}(x,y,t,\theta) = \frac{\sigma}{\sinh 2\kappa h} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right) \quad (3.8)$$

donde h representa la profundidad del agua y κ el número de onda. La frecuencia intrínseca σ es determinada sin interacción de corrientes con el oleaje.

Interacción corrientes-oleaje

La interacción entre las corrientes y el oleaje implica un intercambio de energía, por lo que ambas se ven afectadas. Este efecto se tiene en cuenta con la corrección del número de onda κ con las ecuaciones de Eikonal.

$$\frac{\partial \kappa_x}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \kappa_y}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0 \quad (3.10)$$

El número de onda entonces queda como:

$$\kappa = \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2} \quad (3.11)$$

La frecuencia radial absoluta se calcula como:

$$\omega = \sigma + \kappa_x u^L + \kappa_y v^L \quad (3.12)$$

donde u^L y v^L son las velocidades lagrangianas transversal y longitudinal a la costa, respectivamente. La celeridad de onda queda como:

$$c_x(x, y, t, \theta) = c_g \cos \theta + u^L \quad (3.13)$$

$$c_y(x, y, t, \theta) = c_g \sin \theta + v^L \quad (3.14)$$

La celeridad en el espacio direccional, donde se tienen en cuenta tanto la refracción producida por el fondo (término de primer orden) como la refracción producida por las corrientes (término de segundo orden), se obtiene como:

$$c_\theta(x, y, t, \theta) = \frac{\sigma}{\sinh 2\kappa h} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right) + \cos \theta \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \sin \theta \left(\sin \theta \frac{\partial v}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3.15)$$

Procesos de disipación

Los procesos de disipación de energía que influyen en la propagación de oleaje son:

- Fricción con el fondo (D_f): la disipación por el fondo se modela como:

$$D_f = \frac{2}{3\pi} \rho f_w \left(\frac{\pi H_{rms}}{T_{m01} \sinh \kappa h} \right)^3 \quad (3.16)$$

donde f_w es el coeficiente de fricción y T_{m01} es el período medio definido por los momentos uno y cero del espectro.

- Vegetación: la presencia de vegetación acuática dentro del área de estudio es un mecanismo adicional de disipación para ondas cortas. La vegetación se puede esquematizar en un número de elementos verticales con una propiedad específica. El término de disipación se calcula como la suma de las disipaciones de cada capa de vegetación:

$$D_v = \sum_1^{n_v} D_{v,i} \quad (3.17)$$

donde $D_{v,i}$ es la disipación por cada capa de vegetación y n_v es el número de capas de vegetación. La disipación por capa se calcula como:

$$D_{v,i} = A_v * \frac{\rho C_{D,i} b_{v,i} N_{v,i}}{2\sqrt{\pi}} \left(\frac{g\kappa}{2\sigma} \right)^3 H_{rms}^3 \quad (3.18)$$

con

$$A_v = \frac{(\sinh^3 \kappa \alpha_i h - \sinh^3 \kappa \alpha_{i-1} h) + 3(\sinh \kappa \alpha_i h - \sinh \kappa \alpha_{i-1} h)}{3 \kappa \cosh^3 \kappa h} \quad (3.19)$$

donde $c_{D,i}$ es un coeficiente de arrastre, $b_{v,i}$ es el diámetro del tallo, $N_{v,i}$ es la densidad de vegetación y α_i es la altura de vegetación relativa para la capa i .

Tensor de radiación

Dada la distribución espacial de la acción del oleaje, el tensor de radiación se puede evaluar utilizando teoría lineal:

$$S_{xx,w}(x,y,t) = \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \cos^2 \theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta \quad (3.20)$$

$$S_{xy,w}(x,y,t) = S_{yx,w}(x,y,t) = \int \sin \theta \cos \theta \frac{c_g}{c} S_w d\theta \quad (3.21)$$

$$S_{yy,w}(x,y,t) = \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \sin^2 \theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta \quad (3.22)$$

Forma de la ola

El modelo considerado está promediado en la onda y resuelve la hidrodinámica asociada con el grupo de ondas a escala temporal. Como resultado no se resuelve la forma de la ola. Sin embargo, en una ola propagada de aguas profundas hacia la costa, su forma superficial se convierte en no lineal debido a la amplificación de los armónicos mayores. Una de las formas implementadas que tienen este efecto en cuenta es la formulación de Russink [18], que parametriza la no-linealidad.

Ecuaciones en profundidades reducidas

Para las olas de baja frecuencia y flujos medios se utilizan las ecuaciones en profundidades reducidas. Para tener en cuenta el flujo de masa inducido por el oleaje y el consecuente flujo de retorno utiliza la formulación GML (Generalized Lagrangian Mean) promediada en la profundidad. En este marco, las ecuaciones de equilibrio de momentos y de continuidad están formuladas en términos de la velocidad Lagrangiana u^L que se define como la distancia que una partícula de agua viaja en un período de onda. Esta velocidad se relaciona con la velocidad Euleriana u^E y v^E como:

$$u^L = u^E + u^S \quad (3.23)$$

$$v^L = v^E + v^S \quad (3.24)$$

$$u^S = \frac{E_w \cos \theta}{\rho h c} \quad (3.25)$$

$$v^S = \frac{E_w \sin \theta}{\rho h c} \quad (3.26)$$

Las ecuaciones resultantes son:

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} - \frac{F_{v,x}}{\rho h} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} + f u^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} - \frac{F_{v,y}}{\rho h} \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0 \quad (3.29)$$

donde τ_{sx} y τ_{sy} son las tensiones de cortante producidas por el viento, τ_{bx} y τ_{by} son las tensiones de rozamiento con el fondo, η es la elevación del agua, F_x y F_y son las tensiones producidas por el oleaje, $F_{v,x}$ y $F_{v,y}$ son las tensiones producidas por la vegetación, v_h es la viscosidad horizontal y f es el coeficiente de Coriolis.

3.4 SWAN

En este apartado se va a describir las ecuaciones que gobiernan la propagación del oleaje en el modelo numérico SWAN. Este apartado se ha extraído del manual de SWAN.

3.4.1 Ecuaciones de gobierno

Descripción espectral del oleaje

Debido a la irregular naturaleza del viento, la superficie del mar está continuamente variando, por lo que una descripción determinista de la misma no es posible. La elevación de la superficie del mar, en cualquier lugar y tiempo, puede verse como la suma de un número infinito de olas armónicas, donde cada una de ellas ha sido generada independientemente en diferentes tiempo y lugar. Debido a ello, la elevación de la superficie del mar puede describirse como (Ecuación 3.30)

$$\eta(t) = \sum_i a_i \cos(\sigma_i t + \alpha_i) \quad (3.30)$$

donde η es la elevación de la superficie del mar, a_i la amplitud, σ_i la frecuencia relativa y α_i la fase. Este es el modelo de fase aleatoria. Para oleaje lineal, la frecuencia relativa se rige por la ecuación

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \quad (3.31)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, d la profundidad y k es el número de onda.

El oleaje es irregular por naturaleza, por lo que una descripción en el dominio del tiempo está muy limitada. Por ello, se ha descrito con la varianza de la densidad espectral, que es la transformada de Fourier de la función de autocovarianza de la superficie del mar.

$$S'(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (3.32)$$

$$C(\tau) = \langle \eta(t) \eta(t + \tau) \rangle \quad (3.33)$$

donde $C(\tau)$ es la función de autocovarianza, $\langle \rangle$ representa la expectación matemática de una variable aleatoria, y $\eta(t)$, $\eta(t + \tau)$, representa dos estados aleatorios de la superficie del mar.

En teoría de oleaje, se define otro espectro ligeramente diferente al anterior

$$S(f) = 2 * S'(f) \quad \text{para } f \geq 0 \quad \text{y} \quad S(f) = 0 \quad \text{para } f < 0 \quad (3.34)$$

La varianza $\langle \eta^2 \rangle$ es proporcional a la energía total E_{total} de las olas por unidad de área:

$$E_{total} = \frac{1}{2} \rho_w g \langle \eta^2 \rangle \quad (3.35)$$

Sin embargo, definir la densidad espectral únicamente en función de la frecuencia no es suficiente. Es necesario definirla también en función de la dirección del oleaje. Este espectro, que distribuye la energía del oleaje en frecuencia y dirección, se define como $S(f, \theta)$, y

$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta \quad (3.36)$$

Por tanto, basándonos en el espectro de oleaje, los parámetros del mismo pueden ser obtenidos. Estos pueden expresarse en términos del momento de orden i de la densidad espectral.

$$m_i = \int_0^{\infty} f^i S(f) df \quad (3.37)$$

La varianza de la superficie del mar se define como $m_0 = \langle \eta^2 \rangle$. Un parámetro fundamental es la altura significativa del oleaje, la utilizada como la representativa del estado de mar, y se define como

$$H_s = 4 * \sqrt{m_0} \quad (3.38)$$

También se definen varios períodos de ola:

$$T_{m01} = \frac{m_0}{m_1}, \quad T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}, \quad T_{m-10} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (3.39)$$

Estos parámetros serán los que nos devolverá el modelo numérico y algunos de ellos los usaremos posteriormente para evaluar el recurso energético (Sección ??).

Propagación del oleaje

Según la teoría lineal del oleaje, la velocidad de propagación en el espacio puede ser obtenida según:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = (c_x, c_y) = \vec{c}_g + \vec{u} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2|\vec{k}|}{\sinh(2|\vec{k}|d)} \right) \frac{\sigma \vec{k}}{|\vec{k}|^2} + \vec{u} \quad (3.40)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = c_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right) - c_g \vec{k} \frac{\partial \vec{u}}{\partial s} \quad (3.41)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = c_\theta = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial m} \right) \quad (3.42)$$

Donde c_x, c_y son las velocidades de propagación de la energía del oleaje en el espacio xy, c_θ y c_σ son las velocidades de propagación en el espacio espectral σ y θ , d es la profundidad del agua, s es la coordenada espacial en la dirección de propagación del oleaje (θ) y m es una coordenada perpendicular a s .

Además,

$$\vec{k} = (k_x, k_y) = (|\vec{k}| \cos \theta, |\vec{k}| \sin \theta), \quad \vec{u} = (u_x, u_y) \quad (3.43)$$

y el operador d/dt denota la derivada total a lo largo del camino espacial de la propagación de la energía, y se define como:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{c}_g + \vec{u}) \cdot \nabla_{\vec{x}} \quad (3.44)$$

Toda la información sobre la superficie del mar está contenida en la varianza de la densidad espectral $S(\sigma, \theta)$, distribuyendo la energía del oleaje entre las frecuencias σ y las direcciones de propagación θ (la dirección normal a la cresta de ola de cada componente espectral).

Normalmente, los modelos de oleaje determinan la evolución de la acción de onda $N(\vec{x}, t; \sigma, \theta)$ en el espacio x y el tiempo t . La densidad de acción se define como $N = S/\sigma$ y se conserva durante la propagación, mientras que la densidad espectral S no. El modelo numérico, para

calcular la propagación del oleaje, utiliza la ecuación de acción de onda, que es [?][?]

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (3.45)$$

donde el lado izquierdo es la parte cinemática de la ecuación. El segundo término denota la propagación de la energía del oleaje en el espacio, con la velocidad de grupo $\vec{c}_g = \frac{\partial \sigma}{\partial \vec{k}}$ donde σ se obtiene de la ecuación de la dispersión (Ecuación 3.31), y k es el número de onda. El tercer término representa el efecto del cambio de la frecuencia debido a las variaciones de la profundidad, y el cuarto término representa la refracción. Las variables c_σ y c_θ son las velocidades de propagación en el espacio espectral (σ, θ) . El lado derecho de la ecuación contiene S_{tot} , que es el término que representa todos los procesos físicos que generan, disipan o redistribuyen energía del oleaje, y están definidos por la densidad energética $S(\sigma, \theta)$. Varios procesos contribuyen a S_{tot} :

- Transferencia de energía del viento al oleaje
- Resonancia por la variación de la presión del viento sobre el oleaje
- Fluctuaciones de la presión de la ola
- Disipación, que se representa por la suma de tres contribuciones: fricción, rotura por el fondo y whitecapping.
- Interacciones no lineales

3.5 Parámetros de surf

Dado que para la práctica del surf se requieren unas condiciones específicas de oleaje, se ve necesario establecer unos criterios para determinar la surfeabilidad del oleaje. Se ha tomado como referencia el documento [12]. Los cuatro parámetros principales que influyen en la práctica del surf son [19]:

- Altura de ola en rotura (H_b)

Es determinante en la surfeabilidad de la ola. Como criterio de referencia, en las olas de surf se utiliza la altura de ola media del 10 % de olas mayores ($H_{1/10}$) [9]. Los límites de surfeabilidad de las olas relativos a la altura de ola en rotura están entre 1 y 20 m [11]. Alturas de ola en rotura muy bajas requerirán más experiencia para poder surfear la ola, al igual que sucede con las alturas muy grandes. Los rangos de alturas de ola en rotura y el nivel de experiencia requerido se muestran en la Tabla 3.3.

- Peel angle

Este es otro parámetro de gran importancia, y es el ángulo que forma la línea de rotura con el frente de onda. Toma valores entre 0° y 90° , y refleja la velocidad con que la rotura de la ola avanza a lo largo de la cresta. Los surfistas deben surfear a esta velocidad como mínimo para permanecer frente al punto de rotura. Por tanto, cuanto menor sea el peel angle mayor será la velocidad y por tanto más complicada su surfeabilidad.

- Intensidad y tipo de rotura

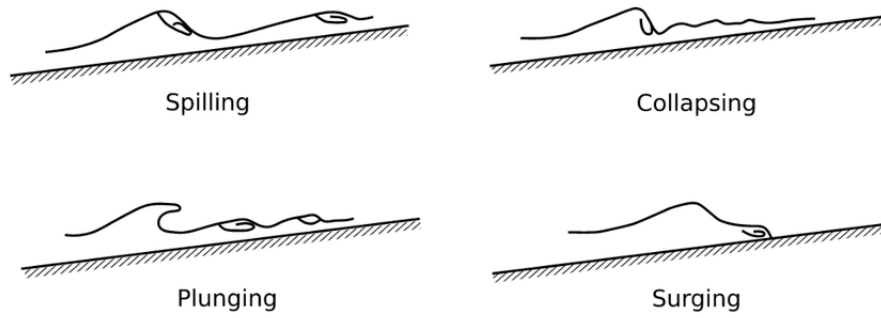


Figura 3.1 Tipos de rotura.

El tipo de rotura de la ola viene determinado fundamentalmente por la batimetría, y es un factor fundamental. Existen tres tipos de rotura establecidos [17]:

- Spilling o rotura en decrestamiento. Este tipo de rotura es bueno para la práctica moderada del surf [7].
- Plunging o rotura en voluta. Este tipo de rotura es el ideal para la práctica del surf.
- Collapsing. En este tipo de rotura la cresta se mantiene intacta y escalonada en la parte frontal, siendo no apta para el surf.
- Surging. La cresta y la cara frontal se mantienen intactas. Tampoco es apta para la práctica del surf.

El tipo de rotura del oleaje se puede determinar con el número de Iribarren:

$$I_r = \frac{s}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}} \quad (3.46)$$

donde I_r es el número de Iribarren, s es la pendiente del fondo en la dirección de avance del oleaje, H_b es la altura de ola en rotura y L_0 es la longitud de onda en aguas profundas. En la siguiente tabla se proporciona el tipo de rotura según el número calculado.

Tabla 3.1 Forma de rotura según el número de Iribarren.

Número de Iribarren	Forma de rotura	Surfeabilidad
$I_r < 0.4$	Spilling	Bueno
$0.4 < I_r < 2$	Plunging	Idóneo
$I_r > 2$	Surging/Collapsing	No apto

La intensidad de rotura [14] se calcula como:

$$Y = 0.065X + 0.821 \quad (3.47)$$

Tabla 3.2 Clasificación de la intensidad de rotura.

Índice	Intensidad
<1.9	Extrema
1.9-2.2	Muy alta
2.2-2.8	Alta
2.8-3.1	Media
>3.1	Baja

donde Y es la intensidad de rotura y X es el gradiente del fondo en la dirección de avance de la ola. A mayor intensidad de rotura más experimentado debe ser el surfista para poder tomar la ola. Una clasificación que relaciona la intensidad de rotura con el índice Y [9] se muestra en la Tabla 3.2.

- Longitud de la sección de ola (S_L)

Debido a que el oleaje y la batimetría son irregulares, la rotura de la ola se produce por tramos. Se comienza una nueva sección cuando cambia la altura de ola, el peel angle o la intensidad de rotura.

En trabajos anteriores se ha realizado una clasificación del oleaje en función de su surfeabilidad [10], mostrándose en la siguiente tabla.

Tabla 3.3 Clasificación del oleaje según surfeabilidad.

Clasificación	Descripción	Límite del peel angle	Rango de H_b (m)
1	Principiante que no es capaz de deslizarse por la ola. Solo se mueve según la dirección de avance de la ola.	90°	0.7-1
2	Capaz de surfear lateralmente a lo largo de la cresta de la ola	70°	0.65-1.5
3	Capaz de generar velocidad impulsándose en la cara de la ola	60°	0.6-2.5
4	Iniciándose y realizando maniobras sencillas ocasionalmente	55°	0.55-4
5	Capaz de realizar maniobras sencillas continuamente en una única ola	50°	0.5->4
6	Capaz de realizar maniobras sencillas continuamente en una única ola. Realiza maniobras difíciles en ocasiones.	40°	0.45->4
7	Surfista avanzado que es capaz de realizar maniobras difíciles sin problemas	29°	0.4->4
8	Profesional que es capaz de realizar maniobras difíciles sin problemas	27°	0.35->4
9	Top 44 surfistas profesionales	Sin límite	0.3->4
10	Surfistas en el futuro	Sin límite	0.3->4

3.6 Perfiles de cálculo

El arrecife en el que se centra el presente estudio, como ya se ha comentado, forma un ángulo de 45°, y se divide en 3 partes (punta, aspa norte, y aspa sur) (Figura 3.2).

En el Trabajo Fin de Máster de referencia [12], se evaluó la vida útil del arrecife en 19 perfiles transversales al mismo (Figura 3.3). En este trabajo se va a realizar el análisis en 6 de los 19 perfiles, utilizando los perfiles 5, 6, 9, 10, 16 y 17, es decir, una pareja de perfiles en cada aspa del arrecife y otra en la punta del mismo (Figura 3.4). Se van a emplear menos perfiles por coste computacional. Además, se toman perfiles consecutivos dado que el cálculo del peel angle se realiza por pareja de perfiles, como se comentará más adelante.

La profundidad en los perfiles se obtiene interpolando la batimetría de referencia, obteniéndose la profundidad en los mismos, mostrada en la Figura 3.5, con respecto al nivel medio.

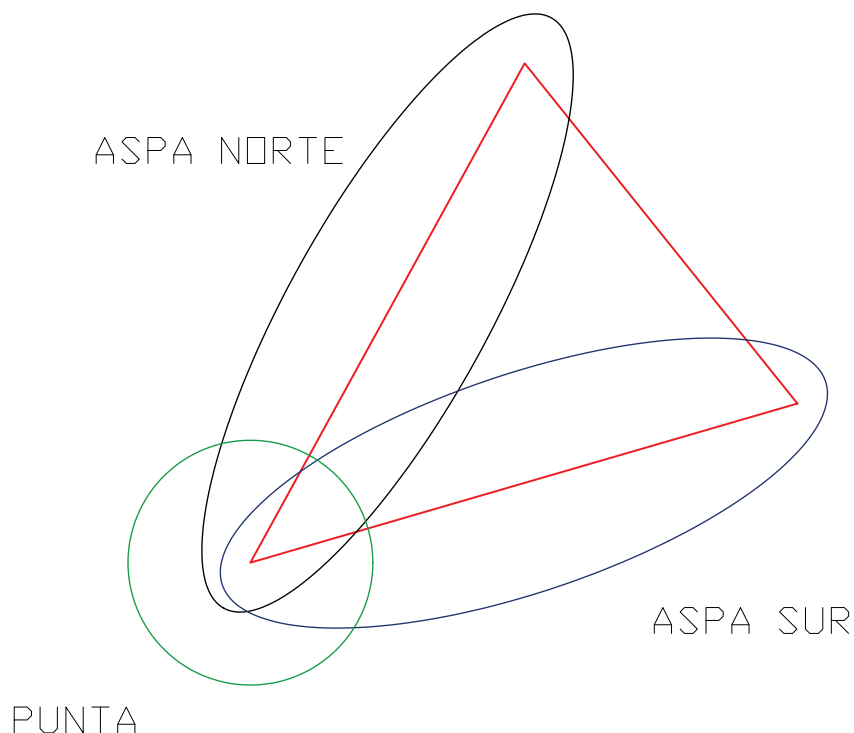


Figura 3.2 Partes del arrecife.

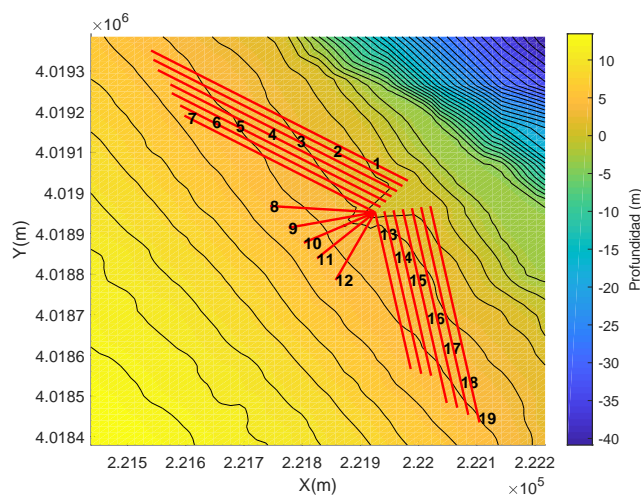


Figura 3.3 Perfiles de referencia.

3.7 Simulaciones

Como ya se ha comentado, se va a evaluar la operatividad del arrecife durante su vida útil utilizando el modelo numérico XBeach. Para ello, se simularán los 500 estados de mar representativos del oleaje tanto en 1D como en 2D, con el objetivo de comparar los resultados de los dos tipos de simulación. La simulación se realizará en régimen estacionario (es decir, oleaje monocromático). Posteriormente, se interpolarán los resultados obtenidos con el fin de disponer de resultados para toda la serie histórica. Además, se realizará una

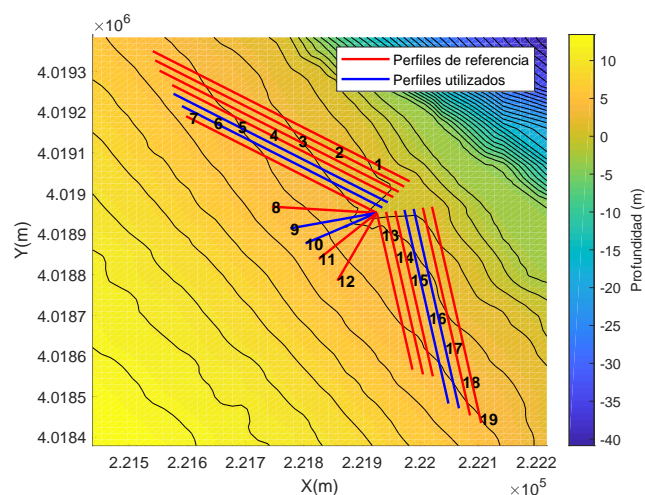


Figura 3.4 Perfiles de referencia.

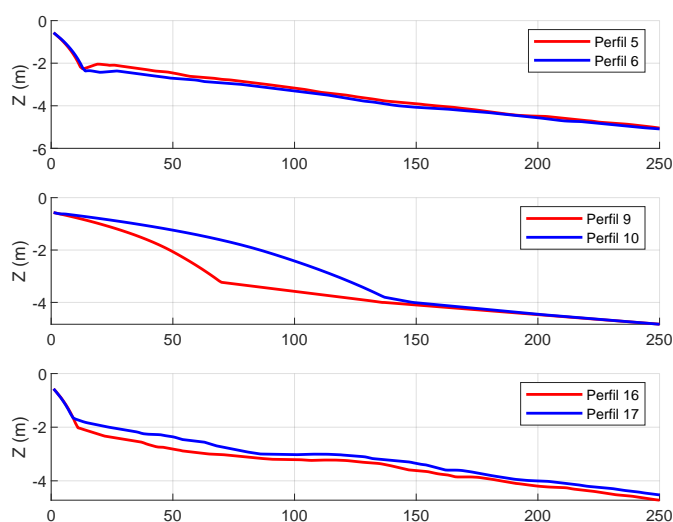


Figura 3.5 Batimetría en los perfiles.

simulación unidimensional en el estado previo, es decir, sin tener en cuenta la presencia del arrecife, de tal manera que se pueda evaluar el cambio que se produciría en la operatividad, previsiblemente a mejor, por la presencia del arrecife. Por último, se realizará una simulación en 1D con el arrecife cubierto por vegetación, teniendo en cuenta la disipación que esta produce, y evaluando su influencia en los parámetros de surf.

- Simulación en 1D

Se va a realizar la simulación unidimensional de los 500 estados de mar representativos con el software XBeach. Ésta se realizará en los 6 perfiles de cálculo descritos anteriormente. Como condición de contorno se le impondrá las condiciones de oleaje en el punto inicial del perfil obtenidas con SWAN en el Trabajo Fin de Máster de referencia [12].

- Simulación en 2D

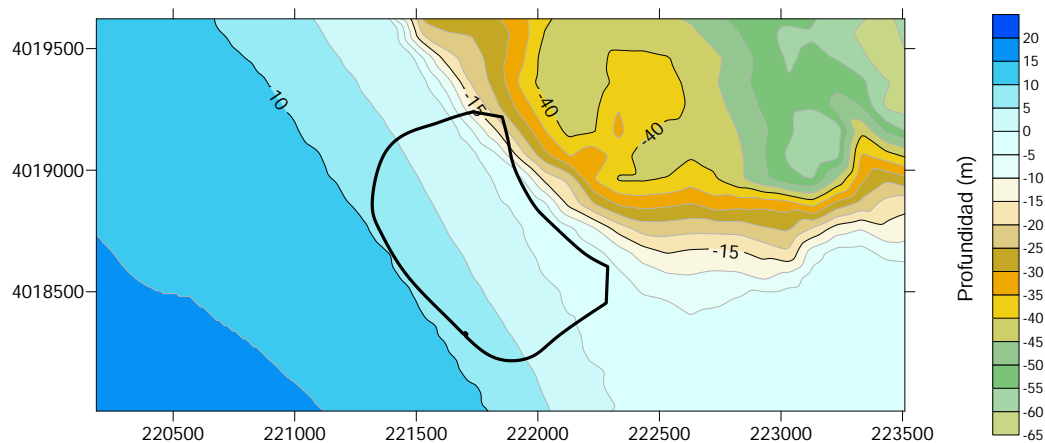


Figura 3.6 Malla de cálculo.

Tabla 3.5 Características de la vegetación.

Altura de vegetación	60 cm
Diámetro del tallo	5 mm
Densidad	2500 uds/m ²
Coefficiente de arrastre	0.7

Para la simulación en 2D es necesario definir la malla de cálculo (Figura 3.6). Ésta tiene una resolución de 200x200 celdas, y las características mostradas en la tabla 3.4. Como condición de contorno se le impone, dado que la condición de contorno es única en el espacio, en el contorno de entrada del oleaje, un estado de mar medio de los resultados de oleaje en el contorno obtenidos con SWAN.

Tabla 3.4 Características de malla.

Tamaño mínimo M	Tamaño máximo M	Tamaño mínimo N	Tamaño máximo N
0.562 m	18.82 m	2.7 m	20.783 m

- Simulación en 1D con vegetación
En este caso, la única diferencia con la simulación unidimensional básica sería la inclusión de vegetación en el arrecife, la cual produce una disipación en el oleaje, variando los parámetros de surf. Las características de la vegetación introducida se muestran en la Tabla 3.5.
- Simulación en 1D (estado previo)
Se ha realizado también una simulación unidimensional en el estado previo, sin arrecife, con el objetivo de realizar una comparación de la situación con arrecife con la situación sin arrecife. De esta manera, se puede evaluar el aumento de la operatividad que se produce por la construcción del arrecife. Para ello, es necesario crear al menos dos perfiles de playa perpendiculares a la línea de costa, los cuales se muestran en la Figura 3.7.



Figura 3.7 Perfiles de cálculo en la situación previa.

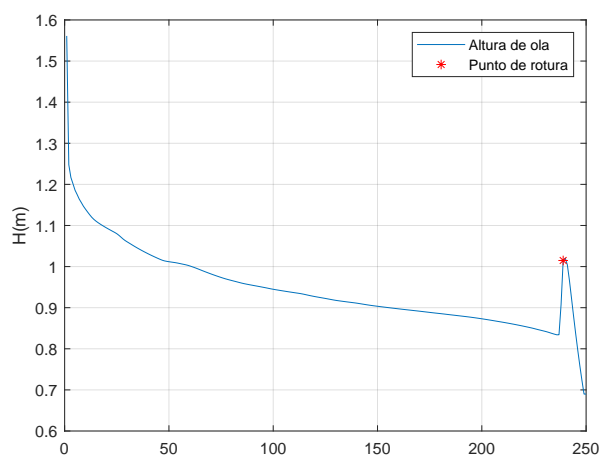


Figura 3.8 Ajuste del parámetro de rotura.

3.8 Criterio de rotura

Como se ha podido ver en apartados anteriores, para determinar la surfeabilidad del oleaje es necesario determinar su rotura. Para ello, se va a utilizar el criterio de McCowan:

$$H_b = \gamma * h \quad (3.48)$$

donde H_b es la altura de ola en rotura, h es la profundidad del agua y γ es un parámetro a determinar. Cuando la altura de ola H en el perfil supera a H_b , se considera que ha roto el oleaje. Si no se alcanza dicho valor el oleaje no llega a romper, por lo que dicho estado de mar no sería operativo, al no producirse rotura.

Para la obtención del parámetro γ , se representa la altura de ola a lo largo del perfil, y se ajusta de tal manera que el punto de rotura coincida visualmente con la caída brusca de la altura de ola (Figura 3.8). Se obtiene que el parámetro $\gamma = 0.78$.

3.9 Reconstrucción de la serie temporal completa

Una vez realizadas las simulaciones para los 500 estados de mar representativos, será necesario obtener los resultados para toda la vida útil del arrecife. Es decir, habrá que realizar una interpolación de los resultados para toda la serie histórica de datos.

Para ello se utilizan las "Radial Basis Functions (RBF)", que representan una buena técnica de interpolación para datos multivariados. Se selecciona el valor óptimo del factor de forma de las RBF. En este punto, es necesario realizar un análisis de sensibilidad para optimizar el número de casos seleccionados que minimiza el error. El número total de componentes de los resultados se obtienen mediante la repetición de los pasos previos para cada uno de manera separada [1].

4 Simulaciones realizadas

En este apartado se describen las simulaciones realizadas, así como los resultados obtenidos, aunque un análisis en profundidad de los resultados se realizará en el capítulo 5.

4.1 Simulación inicial

Se realizó una simulación inicial en 1D en los perfiles del arrecife, utilizando como condición de contorno los resultados obtenidos de la propagación con SWAN desde profundidades indefinidas. Una vez realizadas las simulaciones, se obtuvo que la rotura del oleaje en los perfiles era muy baja, resultando en una operatividad casi nula del arrecife. Es por ello que se ve necesaria la modificación de la geometría del arrecife, de tal manera que se pueda aumentar su operatividad.

4.2 Cambio de la geometría del arrecife

Como ya se ha comentado, es necesario cambiar la geometría del arrecife para facilitar la rotura. Para ello, se proponen los siguientes cambios:

- **Sumergencia**

La sumergencia o distancia de la parte superior del arrecife al nivel medio del mar inicial es de 1.5 m. La profundidad del agua es un factor importante en la rotura (Ecuación 3.48). Por tanto, si disminuye la sumergencia se facilita la rotura del oleaje. Se van a realizar pruebas con tres valores de sumergencia: 0.5, 1 y 1.5 m.

- **Longitud curva del arrecife**

Dado que el arrecife está compuesto por una parte recta en su parte superior y se une al terreno por una parte convexa, se decide, sin modificar el tamaño exterior del arrecife, disminuir la parte curva del mismo aumentando la parte recta. Se realizan pruebas con 3 nuevas longitudes curvas (2, 10 y 100 % de la longitud curva actual).

Por tanto se tienen 9 modificaciones de perfiles diferentes. Se realiza un testeo de los mismos con los estados de mar más frecuentes obtenidos en el capítulo de clima marítimo (Tabla 4.1). En cuanto al nivel del mar, se ha realizado la prueba para un nivel igual al nivel medio del mar en el emplazamiento (NMM).

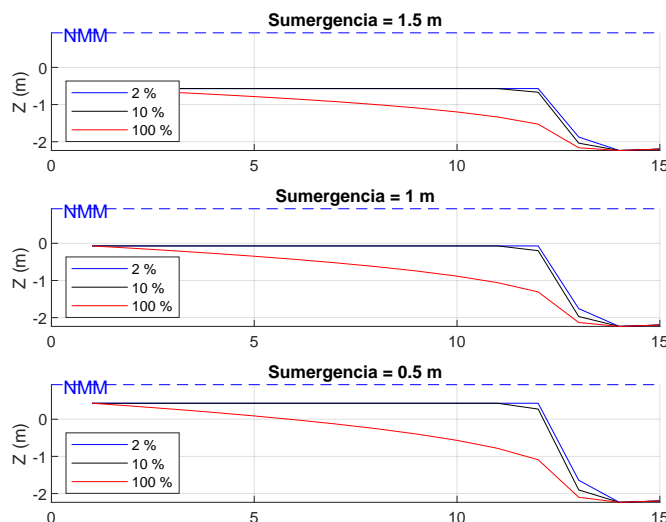


Figura 4.1 Modificaciones perfil 5.

Tabla 4.1 Estados de prueba.

Estado	H_s (m)	T_p (s)	Dir ($^{\circ}$)
1	0.7	3.5	276
2	0.8	3.8	274
3	0.6	3.5	277
4	0.9	3.9	272
5	1.9	5.5	126

Los zona de arrecife modificada en los perfiles de prueba se muestran en las Figuras 4.1 a 4.6.

Tras realizar las simulaciones de prueba de los perfiles, se obtiene la rotura y el peel angle para cada perfil y estado de mar simulado. En primer lugar, como el principal problema presentado con los antiguos perfiles era la no rotura del oleaje, se va a evaluar la rotura (Figuras 4.7 y 4.8). De este análisis se extrae que la única sumergencia que produce la rotura del oleaje es la de 0.5 m. Por tanto, está claro que ésta será la nueva sumergencia del arrecife. En cuanto a la longitud curva de arrecife, se observa un comportamiento similar frente a la rotura del oleaje, siendo un poco más eficiente la del 2%, aunque sin grandes diferencias. Se requieren más datos para tomar una decisión, por ello, se realiza un análisis del peel angle para cada prueba.

Antes de entrar en el análisis del peel angle, es necesario comentar cómo se ha realizado el cálculo del mismo. Como se observa en la Figura 3.4, se han escogido para la simulación 6 perfiles en parejas de 2. Esto es fundamental para el cálculo del peel angle, dado que para ello es necesario obtener la línea de rotura, para lo que es necesario calcular el peel angle por par de perfil, dado que la misma se obtiene como la unión entre los puntos de rotura de los perfiles. El ángulo que forma la línea de rotura con el frente de onda (que se obtiene con la dirección del oleaje), será el peel angle (Figura 4.9).

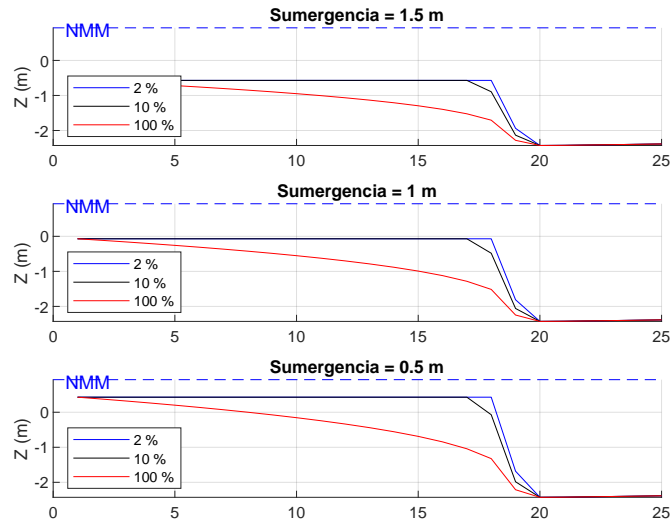


Figura 4.2 Modificaciones perfil 6.

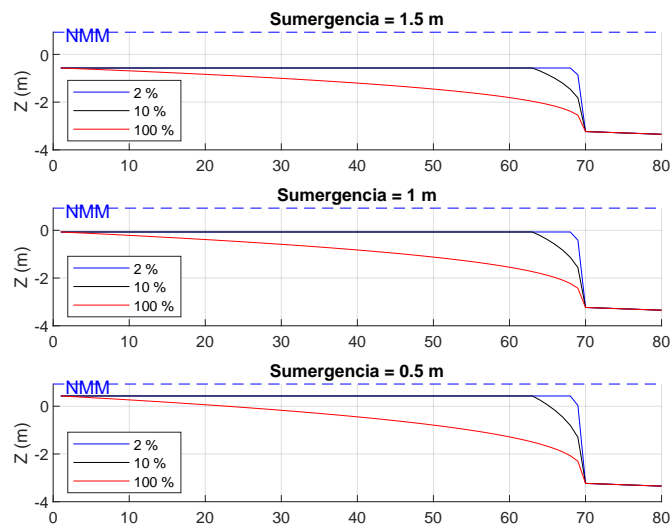


Figura 4.3 Modificaciones perfil 9.

Vistos los resultados obtenidos anteriormente, se ve claro que la decisión está entre los perfiles del 2 % y 10 % de lado curvo para una sumergencia de 0.5 m, descartando las demás opciones. Por ello, se va a calcular el peel angle para estas opciones como un elemento de decisión. De esta manera, se obtienen los resultados mostrados en las Figuras 4.10 a 4.12. En las figuras se observa cómo para los perfiles 5 y 6, el peel angle es mayor para el perfil del 10 %, mientras que para los perfiles [9,10] y [16,17] el de mayor peel angle es el del 2 %, pero con diferencias muy pequeñas con respecto al del 10 %, mientras que en los perfiles [5,6] la diferencia de peel angle es mayor. Esto, unido a que el perfil de arrecife con un lado curvo de longitud el 2 % de la longitud total de arrecife tiene una elevada dificultad y coste constructivo (una transición mucho más brusca), se decide que el perfil más óptimo

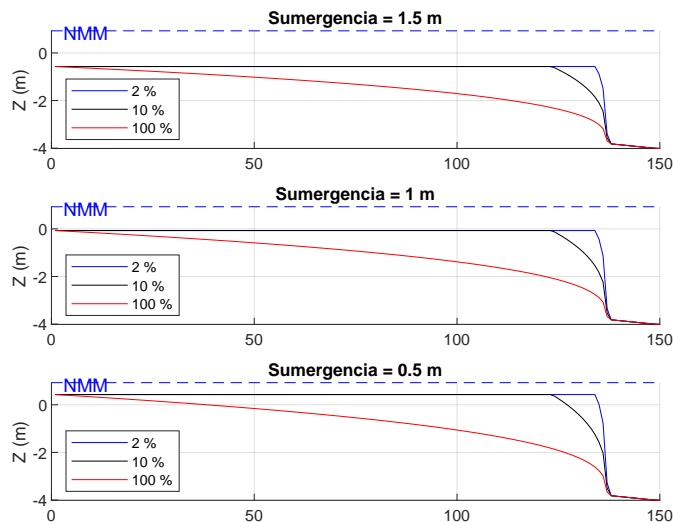


Figura 4.4 Modificaciones perfil 10.

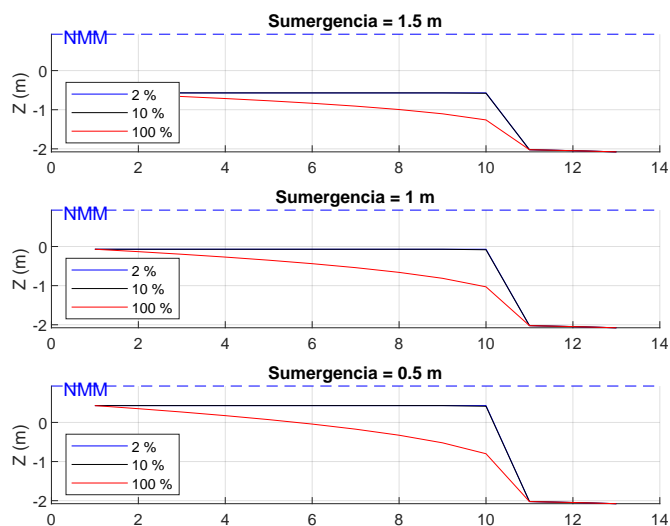


Figura 4.5 Modificaciones perfil 16.

es el que tiene una longitud curva del 10% de la longitud total de arrecife dentro del perfil. Por tanto, se obtiene la nueva geometría del arrecife, la cual se muestra en las Figuras 4.13 a 4.15.

Una vez se tiene la nueva geometría del arrecife, ha habido que modificar la batimetría con la nueva forma de arrecife, y repetir las propagaciones realizadas con SWAN en el TFM de referencia [12] con la nueva batimetría. Con estas propagaciones se obtienen las condiciones de oleaje en el punto inicial de cada perfil, que serán las condiciones de contorno en la simulación con XBeach.

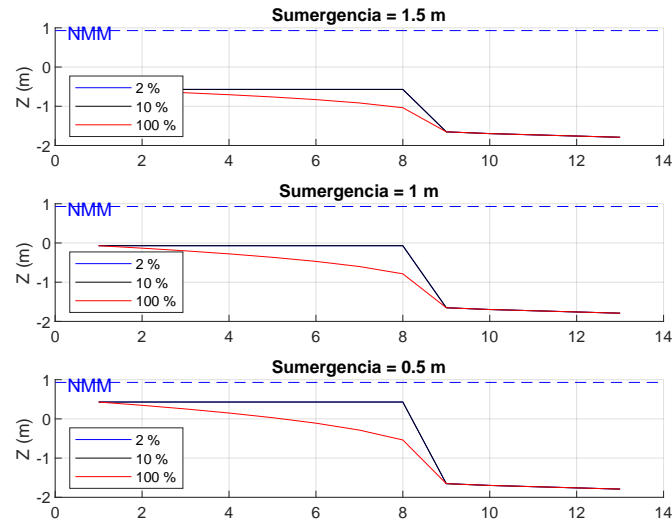


Figura 4.6 Modificaciones perfil 17.

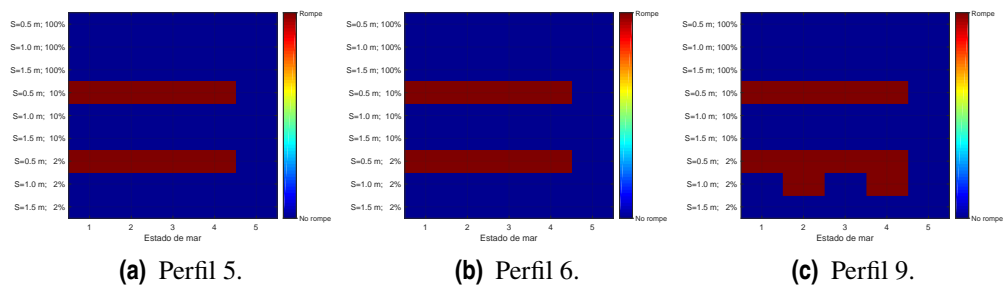


Figura 4.7 Evaluación de la rotura en los perfiles de prueba (I).

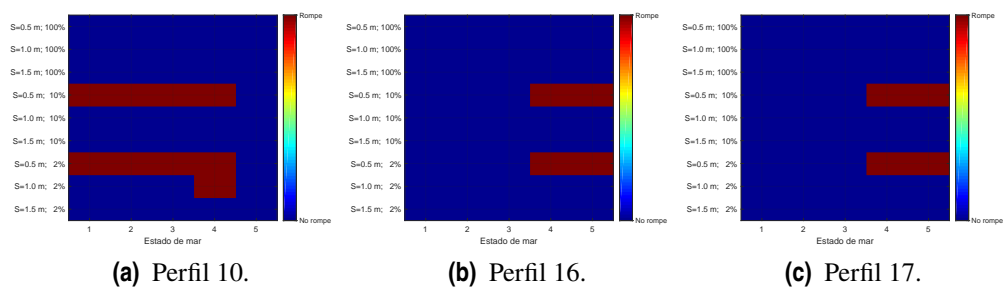


Figura 4.8 Evaluación de la rotura en los perfiles de prueba (II).

4.3 Simulaciones definitiva

4.3.1 Simulación unidimensional

Como ya se ha comentado, se han realizado simulaciones en 1D para los 500 estados de mar representativos del oleaje. Una vez obtenidos los resultados para la muestra, se realiza

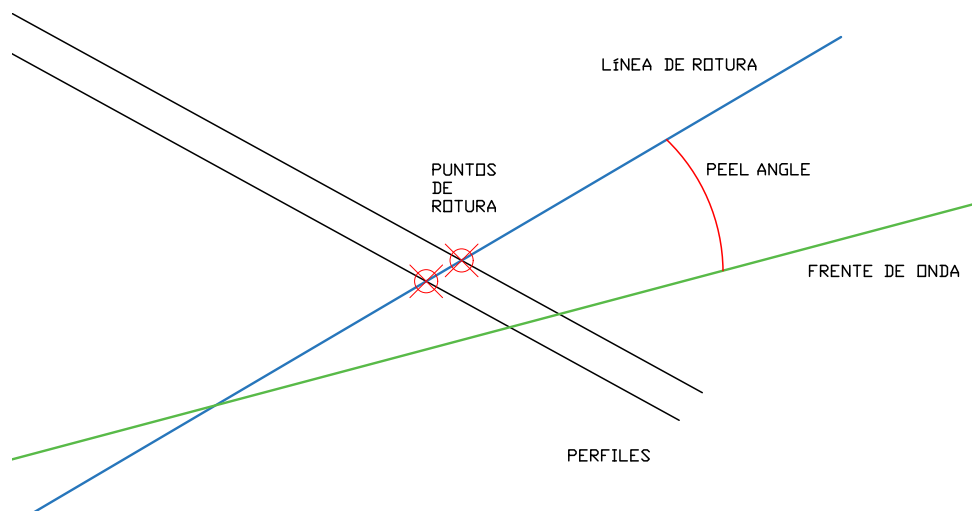


Figura 4.9 Cálculo del peel angle.

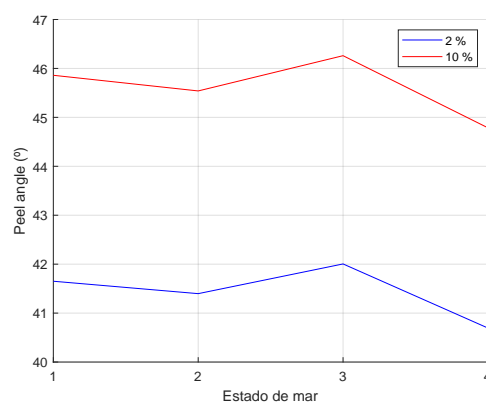


Figura 4.10 Peel angle perfiles 5 y 6.

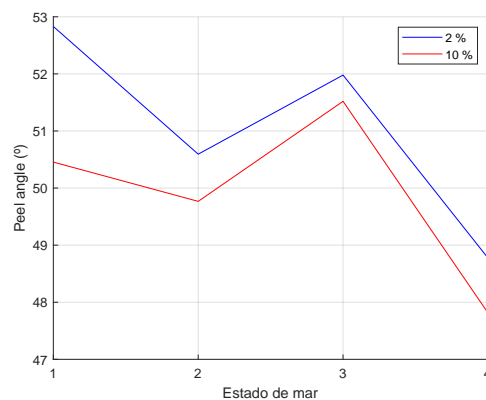


Figura 4.11 Peel angle perfiles 9 y 10.

una interpolación para obtener los resultados a lo largo de toda la vida útil del arrecife. Las simulaciones se han realizado sobre los perfiles modificados, utilizando como condición de contorno:

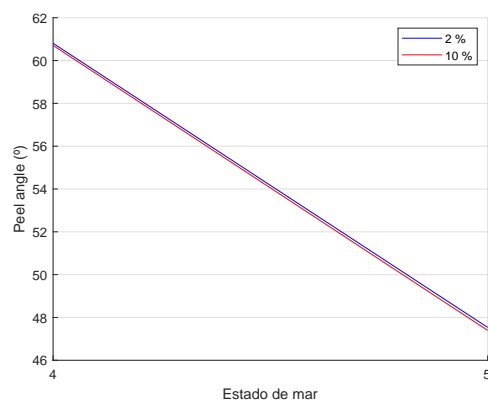


Figura 4.12 Peel angle perfiles 16 y 17.

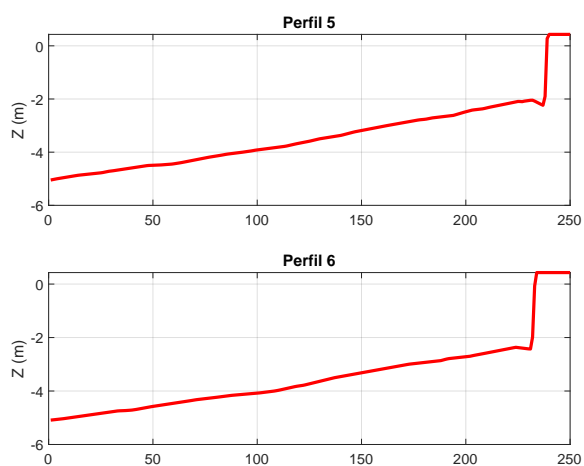


Figura 4.13 Geometría definitiva perfiles 5 y 6.

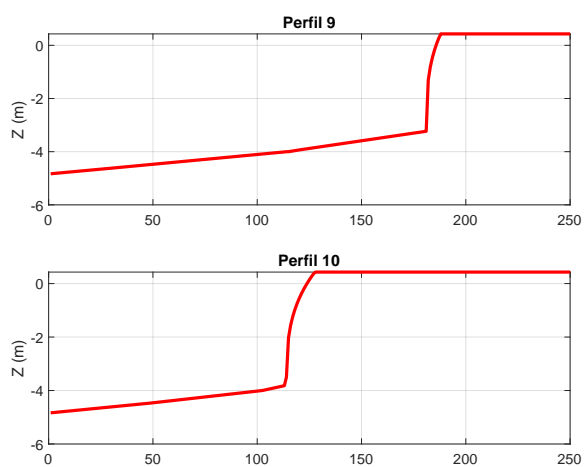


Figura 4.14 Geometría definitiva perfiles 9 y 10.

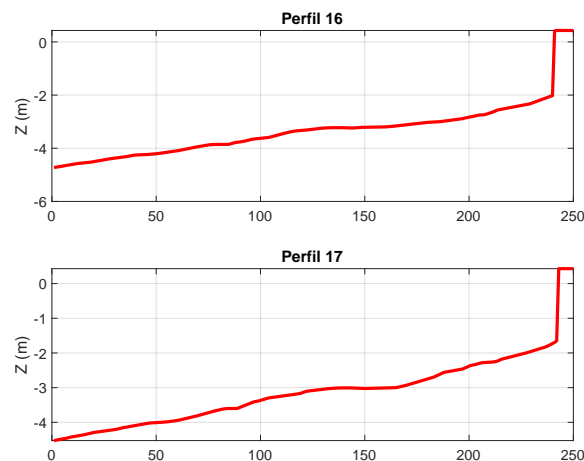


Figura 4.15 Geometría definitiva perfiles 16 y 17.

- Altura de ola (H_s): Se utiliza la altura de ola obtenida con SWAN en el punto inicial del perfil
- Período de pico (T_p): Se utiliza el período de pico del estado de mar en profundidades indefinidas, dado que se considera que no cambia durante la propagación (la variación que se produce es ínfima)
- Dirección de procedencia del oleaje (θ): Se utiliza la dirección obtenida con SWAN en el punto inicial de cada perfil
- Nivel del mar: será la suma de las siguientes dos componentes
 - Nivel del mar en profundidades indefinidas
 - Set-up: es la sobreelevación del nivel del mar producida por la rotura del oleaje, y también se obtiene con los resultados de SWAN

Posteriormente, se ha realizado la misma simulación con la inclusión de la vegetación comentada en la Sección 3.7.

4.3.2 Simulación estado previo

Como ya se ha comentado, se ha realizado una simulación sin arrecife, con el objetivo de comparar la situación con arrecife con un estado previo, para evaluar el previsible aumento de la operatividad que se produciría. Se realiza una simulación unidimensional en los perfiles definidos en la Sección 3.7.

4.3.3 Simulación bidimensional

Como ya se ha comentado, se va a realizar una simulación en 2D con el objetivo de comparar con los resultados en 1D, presumiblemente menos precisos. La simulación numérica se realizará sobre la malla de cálculo definida en la Sección 3.7. Al igual que en el modelo unidimensional, por coste computacional se realizará la simulación sobre la muestra representativa de 500 estados de mar, interpolando posteriormente para obtener los resultados a lo largo de la vida útil del arrecife. Las condiciones de contorno necesarias

son las mismas que en el caso 1D, con la única diferencia de que en este caso, aunque también se obtienen de los resultados de SWAN, como la condición es única en el contorno (no son posibles condiciones de contorno variables en el espacio), se impondrá la media de todo el contorno como condición única.

5 Análisis de resultados

En este capítulo se va a realizar un análisis de los resultados obtenidos a lo largo de la vida útil del arrecife. Para ello, se procede a calcular los siguientes parámetros:

- Porcentaje de rotura
- Altura de ola en rotura
- Peel angle
- Intensidad de rotura
- Operatividad: para un estado de mar concreto, se dice que es operativo si se cumplen las siguientes condiciones:
 - La ola ha roto
 - La altura de ola en rotura es mayor a 0.3 m

5.1 Simulación unidimensional (Con arrecife y sin vegetación)

Se procede a mostrar los resultados obtenidos en las simulaciones unidimensionales con arrecife, pero sin la inclusión de la vegetación.

5.1.1 Porcentaje de rotura

En la Figura 5.1 se muestra el porcentaje de rotura del oleaje a lo largo de la vida útil del dispositivo. Se observa un porcentaje del 30-40% de rotura en los perfiles, 5, 6, 16 y 17; y un porcentaje mucho mayor, alrededor al 90%, para los perfiles 9 y 10. Esto es debido a la geometría de estos perfiles (ver Figura 4.13). Se puede observar que esta pareja de perfiles, situados en la punta del arrecife, tiene una diferencia de altura mucho mayor del arrecife con respecto al fondo (4 m de diferencia) que los perfiles situados en las aspas del mismo (2 m de diferencia). Esto hace que el cambio sea mucho más brusco, y por tanto, favoreciendo la rotura del oleaje.

5.1.2 Altura de ola en rotura

En cuanto a la altura de ola en rotura, se muestra en la Figura 5.2 los resultados obtenidos. Dicha imagen es un gráfico tipo *Boxplot* cuya interpretación es la siguiente:

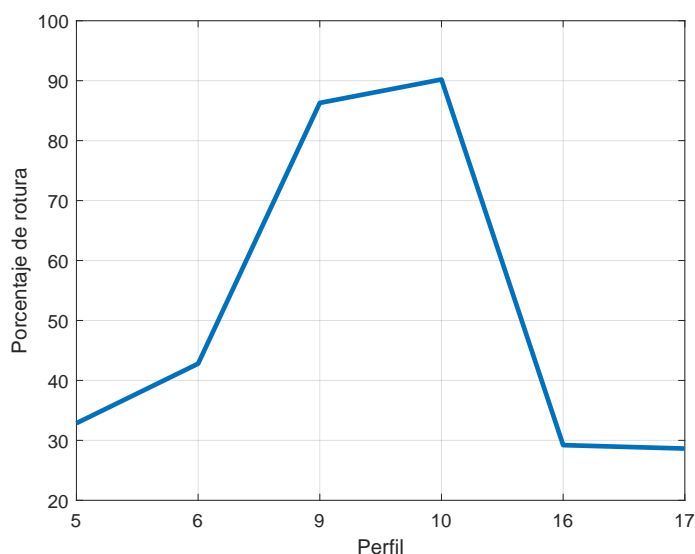


Figura 5.1 Porcentaje de rotura del oleaje en la vida útil del arrecife.

Tabla 5.1 Resumen de la altura de ola en rotura.

Perfil	Altura mínima (m)	Altura máxima (m)	Mediana (m)	Percentil 25 (m)	Percentil 75 (m)
5	0.1	1.30	0.42	0.25	0.64
6	0.1	1.42	0.54	0.28	0.85
9	0.1	2.13	0.77	0.44	1.09
10	0.1	2.45	0.78	0.45	1.12
16	0.1	1.35	0.32	0.19	0.56
17	0.1	1.329	0.32	0.19	0.54

- Los valores incluidos dentro de la caja representan aquellos dentro del rango [25-75] percentil
- Las líneas discontinuas representan aquellos valores que se desvían de los más probables en una dimensión igual al tamaño de la caja
- Los valores representados por puntos rojos son los valores extremos
- La línea roja dentro de la caja representa la mediana de los valores

Por tanto, de la gráfica se puede deducir que los valores más probables de altura de ola en rotura se encuentran por debajo de 1 m. Es importante recordar que alturas muy bajas implican que es necesario ser un surfista más experimentado para poder surfear la ola. En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de la altura de ola en rotura. Como se puede observar, el perfil con mayores valores de altura en rotura es el 10, seguido por el 9, siendo los perfiles 5, 6, 16 y 17 los de menor altura, concordando con los resultados de porcentaje de rotura mostrados anteriormente. Es destacable comentar que las mayores alturas de ola en rotura se producen en los perfiles situados en la punta del arrecife.

En las Figuras 5.3 a 5.8 se puede observar de manera muy visual la altura de ola en rotura en los perfiles a lo largo de toda la serie histórica de datos.

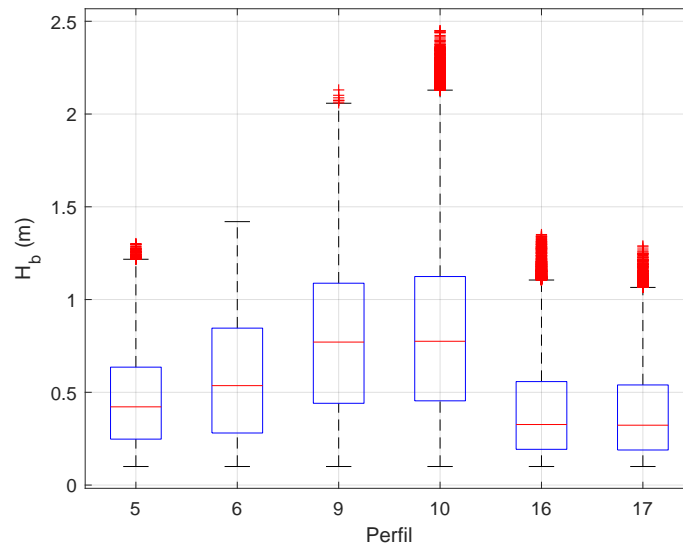


Figura 5.2 Distribución de la altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife.

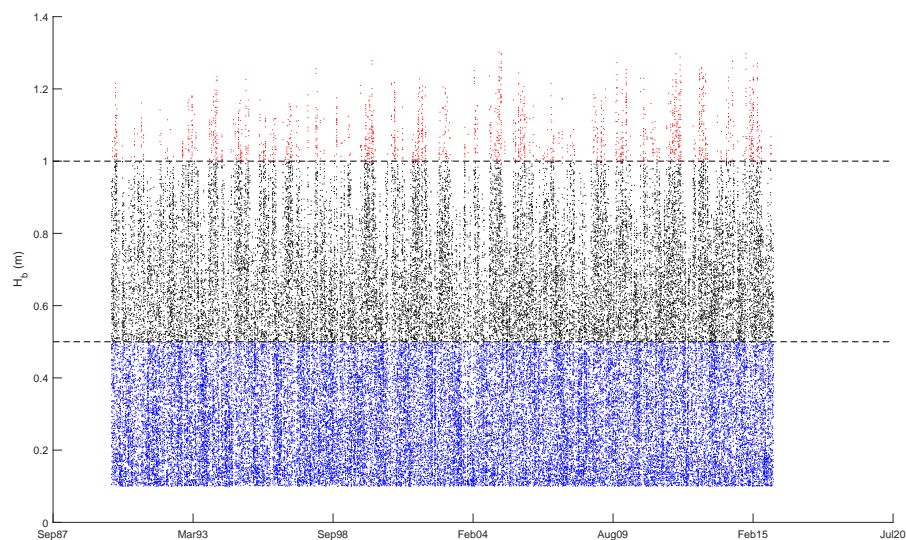


Figura 5.3 Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 5.

5.1.3 Peel angle

En cuanto al peel angle, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.9. Como ya se ha comentado, este resultado se da por pareja de perfiles. Se observan mayores valores probables del peel angle para la pareja de perfiles 16-17, aunque con una menor distribución de resultados, concentrándose todos en un rango muy pequeño de valores. Para la pareja de perfiles 9-10, que es la de mayor porcentaje de rotura, sin embargo se tienen menores valores probables del peel angle, aunque las diferencias no son muy elevadas, además de que valores puntuales sí son más altos. En cambio, la pareja de perfiles 5-6 es la que mayor

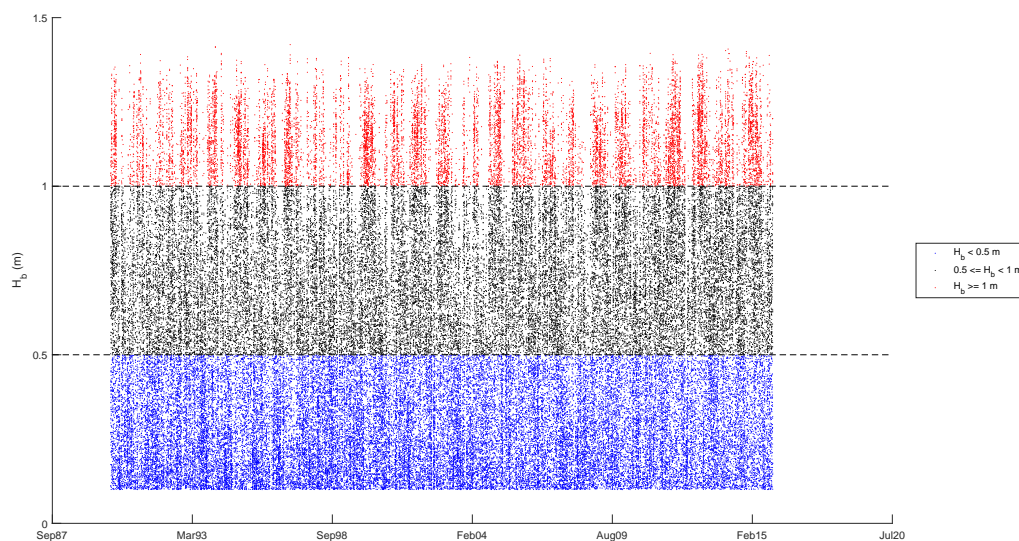


Figura 5.4 Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 6.

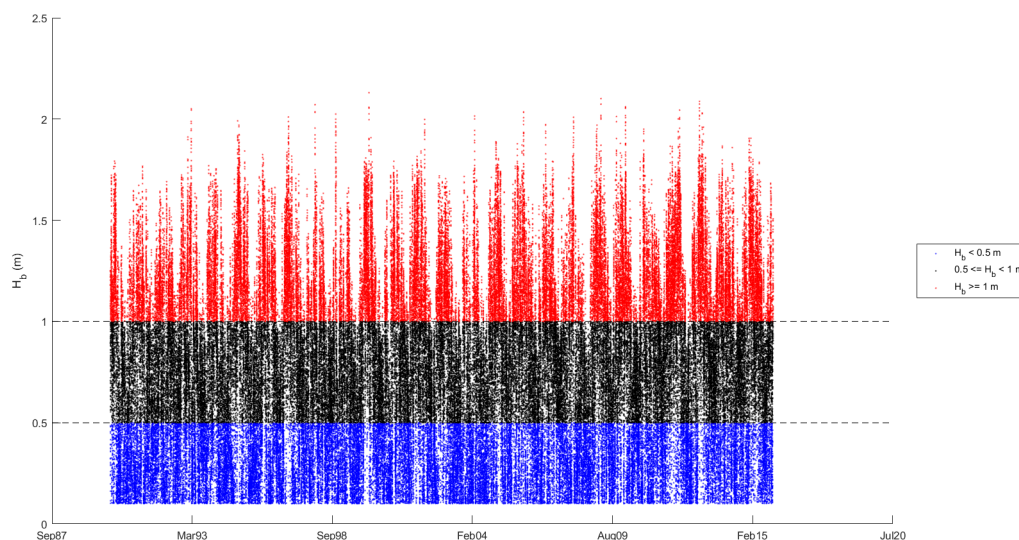


Figura 5.5 Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 9.

distribución de resultados tiene, pero con menores valores probables. En la Tabla 5.2 se muestra un resumen de los resultados del peel angle.

En las figuras 5.10 a 5.12 se representa el histograma de frecuencias del peel angle. El peel angle puede tomar valores de 0 a 90°, y para la representación se ha dividido en los rangos de peel angle que limitan el nivel del surfista (ver Tabla 3.3). Los perfiles 5-6 y 9-10 son los que tienen una mejor distribución del peel angle, estando accesible la práctica del surf

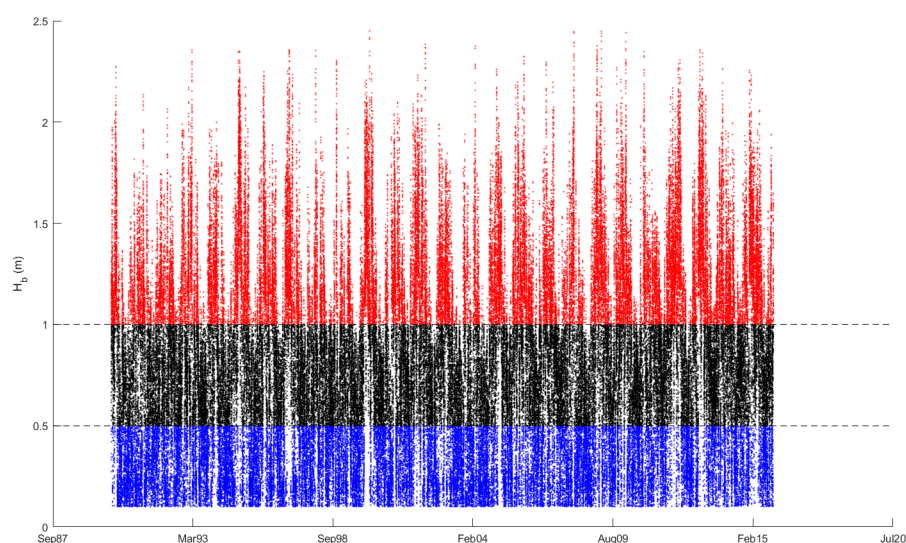


Figura 5.6 Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 10.

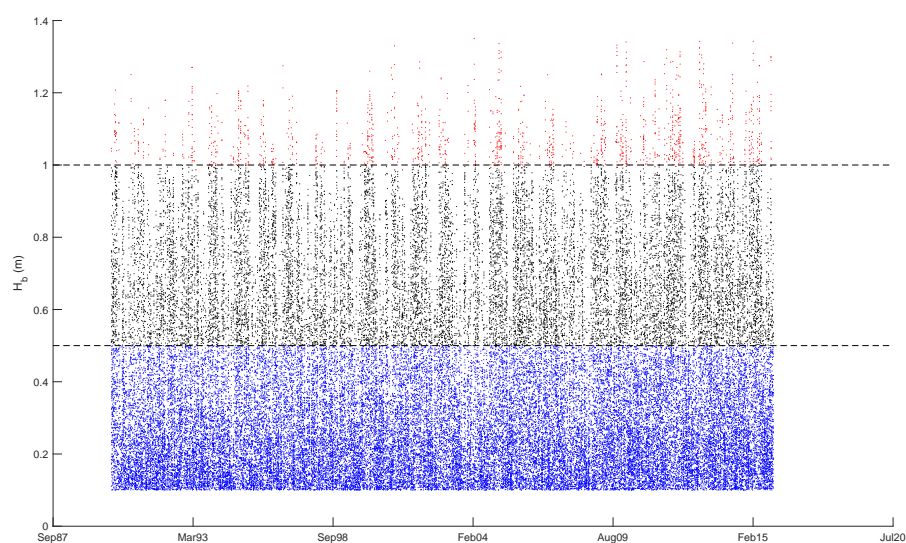


Figura 5.7 Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 16.

Tabla 5.2 Resumen del peel angle.

Pareja de perfiles	Peel angle mínimo (°)	Peel angle máximo (°)	Mediana (°)	Percentil 25 (°)	Percentil 75 (°)
5-6	0	83.93	22.66	16.37	31.99
9-10	0	67.86	27.02	21.73	31.87
16-17	31.84	51.34	36.31	33.61	36.38

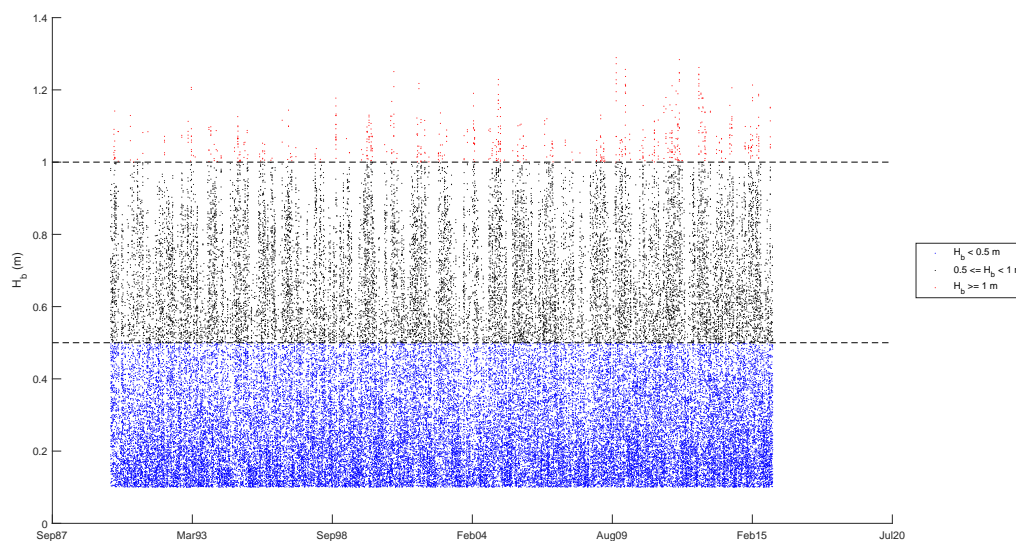


Figura 5.8 Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 17.

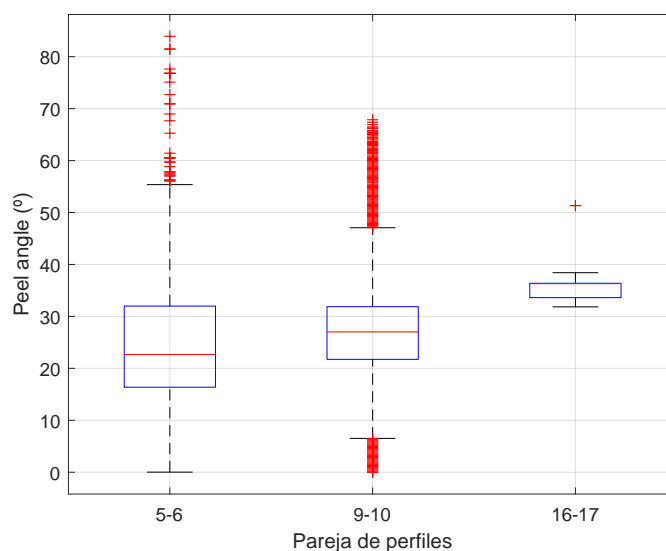


Figura 5.9 Distribución del peel angle a lo largo de la vida útil del arrecife.

para más niveles. En cambio, la pareja de perfiles 16-17 concentra gran parte de los valores en un único rango (28-40°), que además son valores medios-bajos, lo que requiere niveles de alta experiencia para la práctica del surf.

5.1.4 Intensidad de rotura

En cuanto a la intensidad de rotura, como ya se ha comentado, es un parámetro fundamental, y cuanto mayor sea mayor experiencia debe tener el surfista. Recordando, la intensidad de

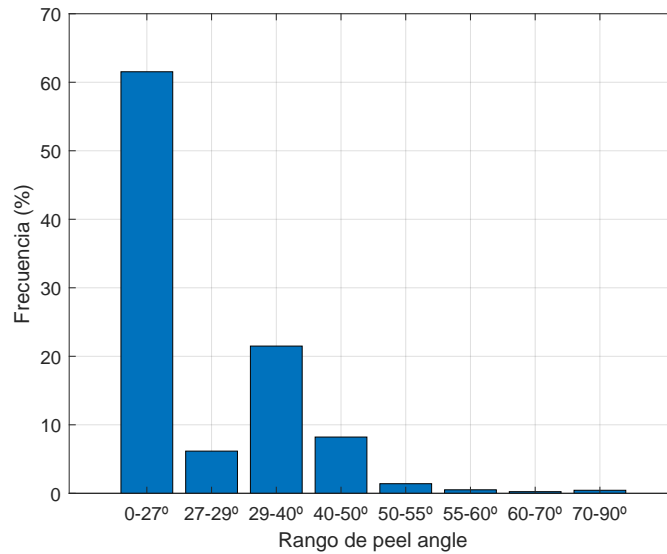


Figura 5.10 Distribución del peel angle perfiles 5-6.

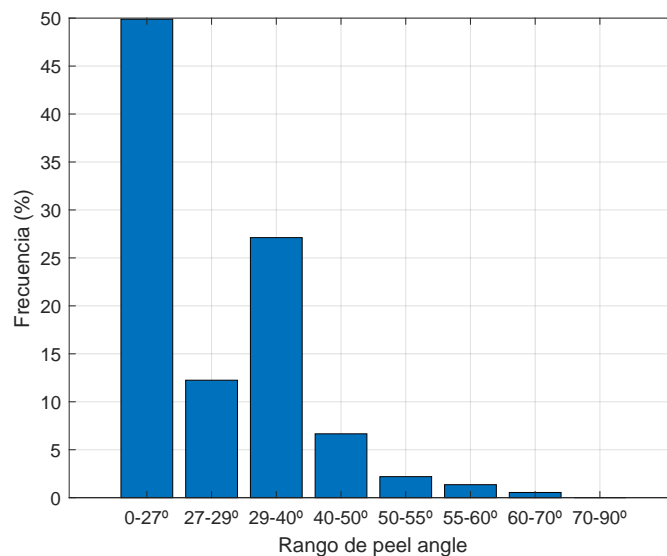


Figura 5.11 Distribución del peel angle perfiles 9-10.

rotura se calcula como:

$$Y = 0.065X + 0.821 \quad (5.1)$$

Por tanto, valores altos de Y corresponden con intensidades de rotura bajas, y valores bajos de Y corresponden con intensidades de rotura altas o extremas.

En la Figura 5.13 se muestra una distribución de la intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Para ciertos perfiles (6, 10 y 17) se puede observar una tendencia clara de intensidades de rotura *Extremas*. Por otro lado, los perfiles 5,9 y 16 presentan valores probables de intensidad de rotura *Medios*. Por último, los perfiles 5 y 9 tiene una

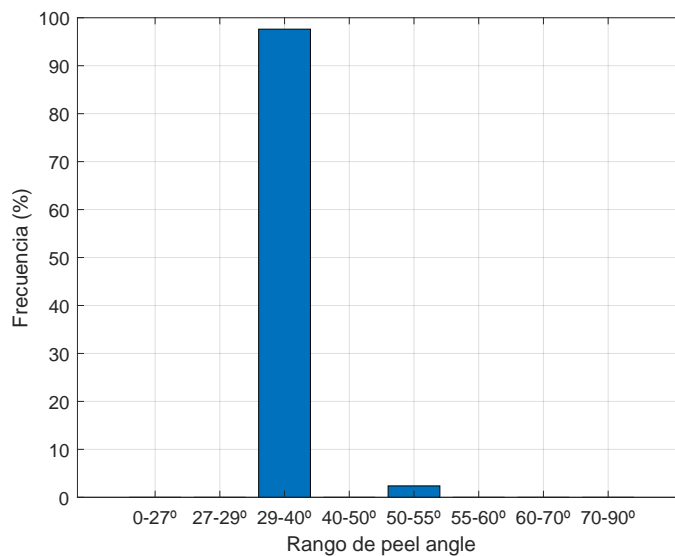


Figura 5.12 Distribución del peel angle perfiles 16-17.

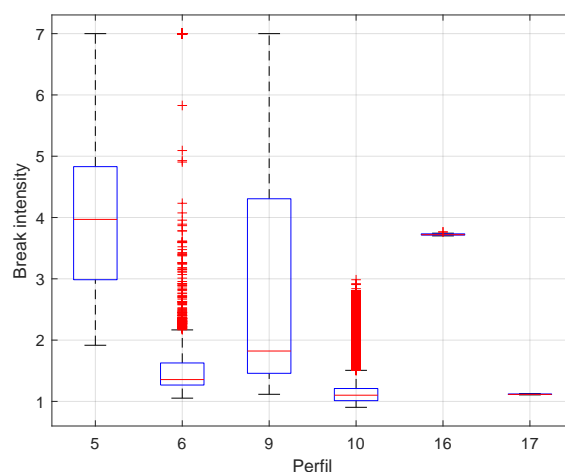


Figura 5.13 Distribución de la intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife.

alta distribución de los valores obtenidos de intensidad de rotura.

En las Figuras 5.14 a 5.19 se muestran los resultados obtenidos a lo largo de la serie histórica de datos, corroborando lo comentado anteriormente.

5.1.5 Operatividad

Se ha calculado la operatividad del arrecife. Como ya se ha comentado, para que sea operativo, se deben cumplir dos condiciones, que exista rotura del oleaje y que la altura de ola en rotura sea mayor a 0.3 m. En la Figura 5.20 se muestran los resultados de operatividad obtenidos. Se observan altos valores de operatividad (80 %) en la punta del arrecife (perfiles 9 y 10), mientras que en las aspas se observan menores valores de operatividad, menor en el aspa sur (perfiles 16 y 17) que en el aspa norte. El hecho de que en la punta la operatividad sea mayor es debido a la geometría de estos perfiles (ver Figura 4.13). Se puede observar

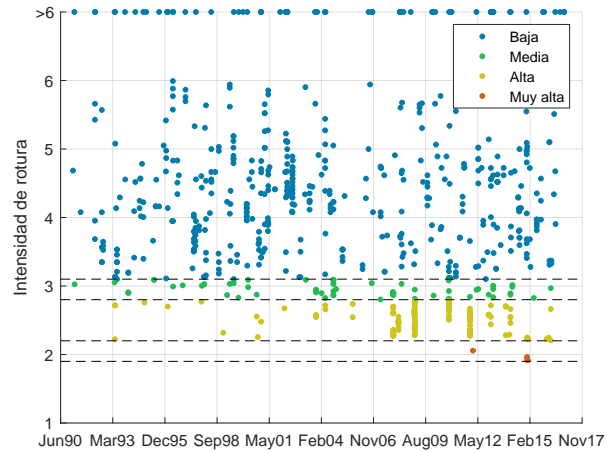


Figura 5.14 Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 5.

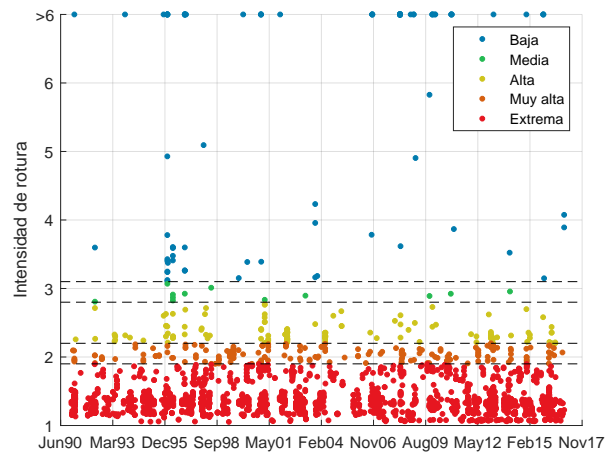


Figura 5.15 Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 6.

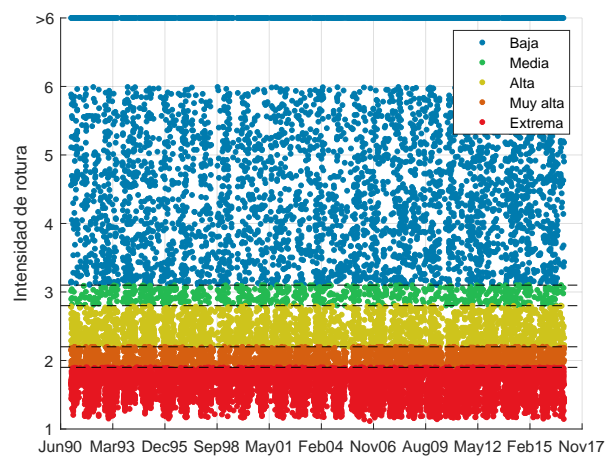


Figura 5.16 Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 9.

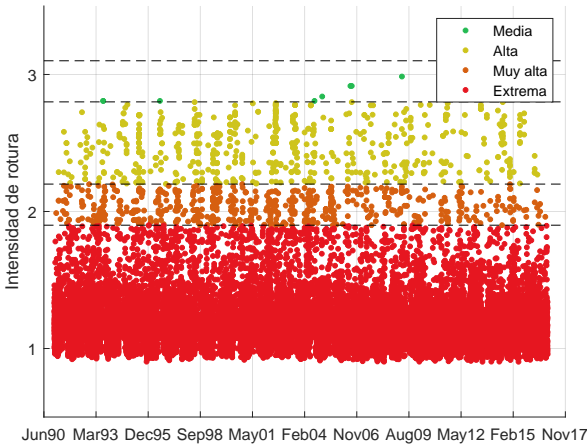


Figura 5.17 Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 10.

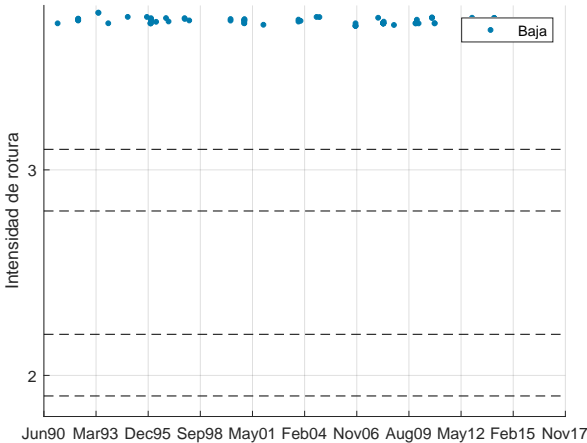


Figura 5.18 Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 16.

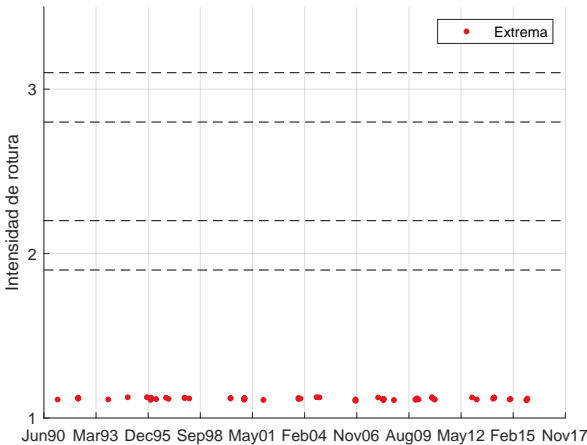


Figura 5.19 Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 17.

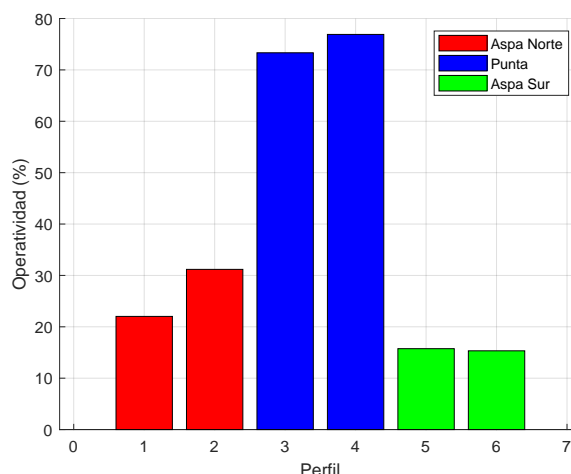


Figura 5.20 Operatividad en el arrecife.

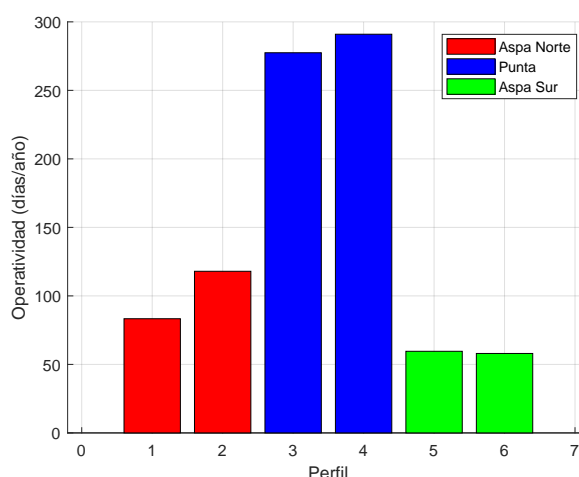


Figura 5.21 Operatividad en el arrecife.

que esta pareja de perfiles, situados en la punta del arrecife, tiene una diferencia de altura mucho mayor del arrecife con respecto al fondo (4 m de diferencia) que los perfiles situados en las aspás del mismo (2 m de diferencia). Esto hace que el cambio sea mucho más brusco, y por tanto, favoreciendo la rotura del oleaje.

Por otro lado, también se pueden ver los resultados en función del número de días al año que es operativo. En la Figura 5.21 se muestran estos resultados, donde obviamente el número de días al año que las correspondientes partes del arrecife son operativas son proporcionales a los porcentajes mostrados en la Figura 5.20.

Podemos considerar que la operatividad global del arrecife es la mayor de todos los perfiles (en este caso, la del perfil 10), dado que el arrecife será operativo cuando uno de los perfiles sea operativo. Con esto, se pudo calcular la operatividad por estación, que es más o menos uniforme para todas las estaciones del año.

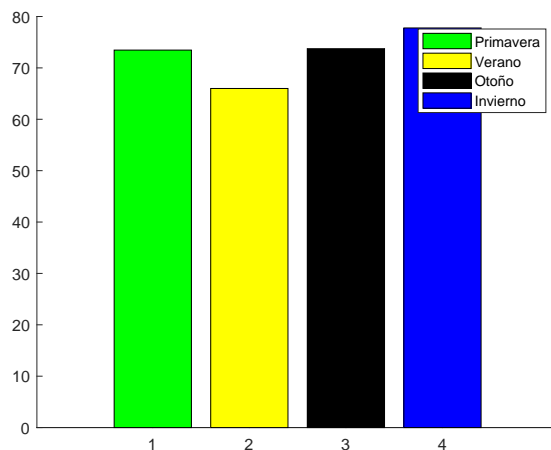


Figura 5.22 Operatividad en el arrecife por estación.

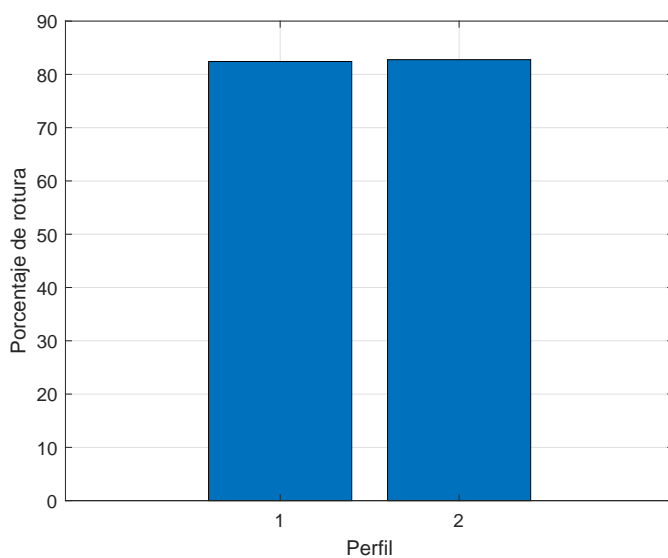


Figura 5.23 Porcentaje de rotura del oleaje para la serie histórica de datos.

5.2 Simulación unidimensional (Sin arrecife)

En este apartado se procede a mostrar los resultados obtenidos en las simulaciones unidimensionales sin arrecife, es decir, en el estado previo, y se compararán los resultados obtenidos con los de las simulaciones realizadas con arrecife.

5.2.1 Porcentaje de rotura

En la Figura 5.23 se muestra el porcentaje de rotura del oleaje a lo largo de toda la serie histórica de datos. Se observan altos porcentajes de rotura, parecidos a los obtenidos con las simulaciones con arrecife.

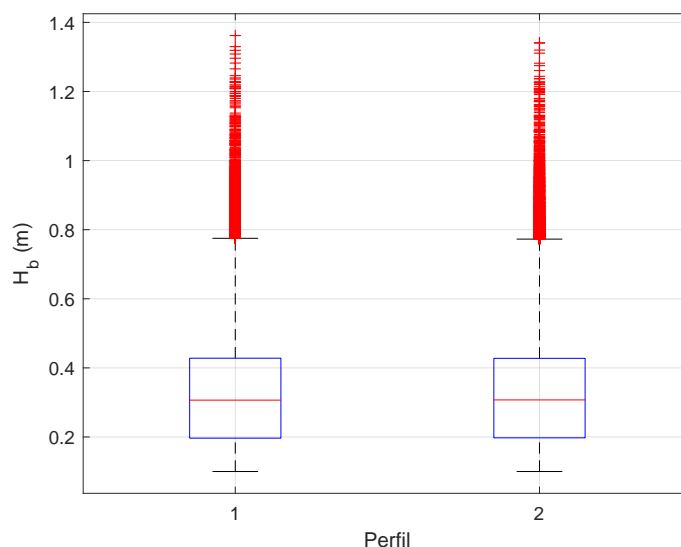


Figura 5.24 Distribución de la altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife.

5.2.2 Altura de ola en rotura

En cuanto a la altura de ola en rotura, se muestra en la Figura 5.24 los resultados obtenidos. De la gráfica se puede deducir que los valores más probables de altura de ola en rotura se encuentra por debajo de 0.4 m. Ambos perfiles tienen alturas de ola en rotura similares. Estos resultados de altura de ola en rotura hacen que en el estado previo, la mayor parte de las olas surfeables sólo lo sean por surfistas experimentados, dado que para alturas de ola menores a 0.5 m se requerían niveles mayores (Tabla 3.3).

Si comparamos los resultados obtenidos con los obtenidos en las simulaciones con arrecife (Figura 5.2), se obtienen alturas de ola en rotura mucho menores en el estado previo. Es decir, la presencia del arrecife aumenta la altura de ola en rotura, aumentando la operatividad, tal y como se observa en la Figura 5.25, en la que se muestra la altura de ola en rotura a lo largo de toda la serie histórica de datos, para el caso con arrecife y para el estado previo.

En las Figuras 5.26 y 5.27 se puede observar de manera muy visual la altura de ola en rotura en los perfiles a lo largo de toda la serie histórica de datos. De nuevo, si comparamos estos resultados con los obtenidos en las simulaciones con arrecife, se tienen alturas de ola mucho menores.

5.2.3 Peel angle

En cuanto al peel angle, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.28. Como ya se ha comentado, este resultado se da por pareja de perfiles. Se observan mayores valores del peel angle que en el estado con arrecife (Figura 5.9).

En la Figura 5.29 se representa el histograma de frecuencias del peel angle. El peel angle puede tomar valores de 0 a 90°, y para la representación se ha dividido en los rangos de peel angle que limitan el nivel del surfista (ver Tabla 3.3). Se observa que la mayoría de resultados del peel angle se encuentran entre 70 y 90°. Estos valores obtenidos son mucho mayores que en el caso con arrecife. Aunque valores altos del peel angle permiten la práctica

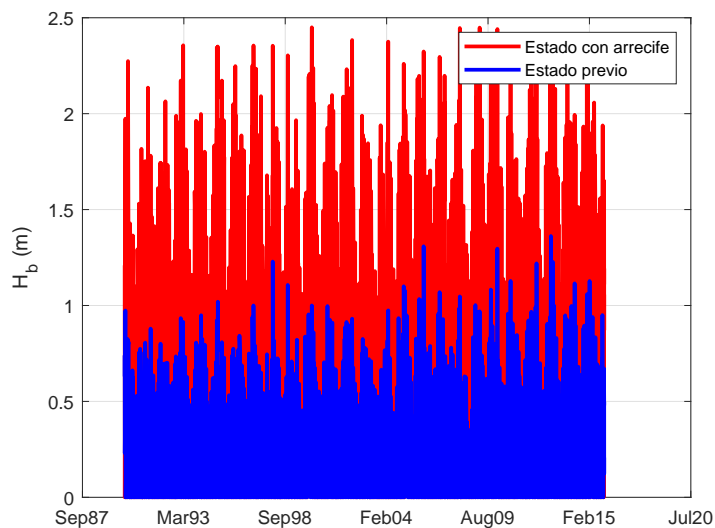


Figura 5.25 Comparación de la altura de ola en rotura a lo largo de la serie histórica de datos.

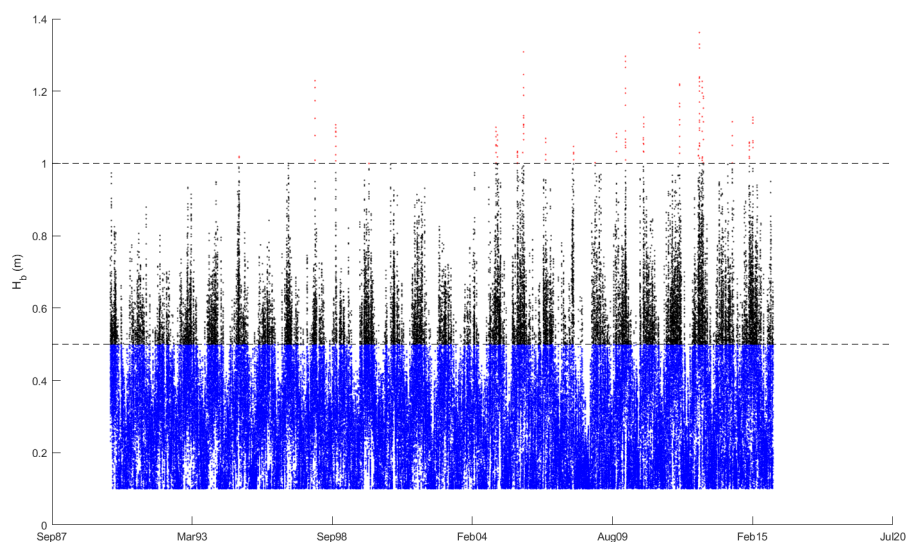


Figura 5.26 Altura de ola en rotura en el estado previo. Perfil 1.

del surf a un mayor número de personas, dado que no se requiere ser muy experimentado para surfear en este rango de peel angle, estos valores sólo permiten maniobras muy básicas, por lo que son peores resultados que en el caso con arrecife, en el cual se tienen valores más distribuidos (en este caso están todos los valores muy concentrados en un único rango) (Ver Tabla 3.3).

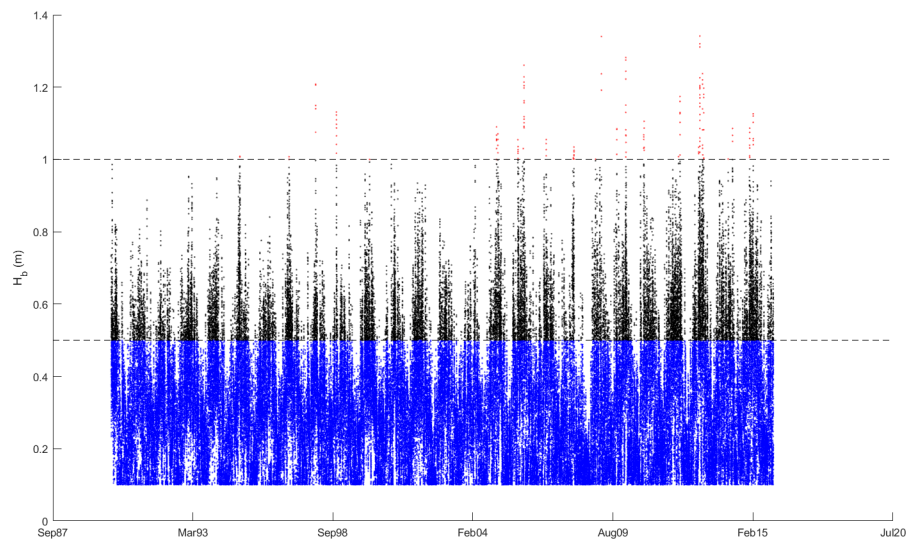


Figura 5.27 Altura de ola en rotura en el estado previo. Perfil 2.

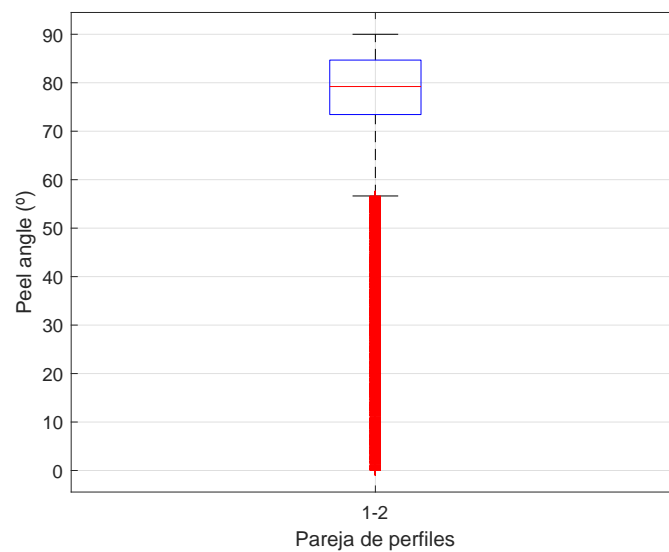


Figura 5.28 Distribución del peel angle en el estado previo.

5.2.4 Intensidad de rotura

En cuanto a la intensidad de rotura, como ya se ha comentado, es un parámetro fundamental, y cuanto mayor sea mayor experiencia debe tener el surfista. Recordando, la intensidad de rotura se calcula como:

$$Y = 0.065X + 0.821 \quad (5.2)$$

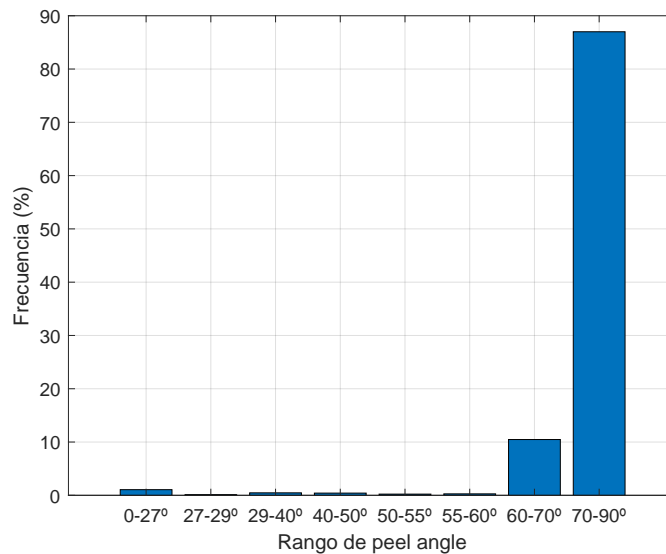


Figura 5.29 Distribución del peel angle en el estado previo.

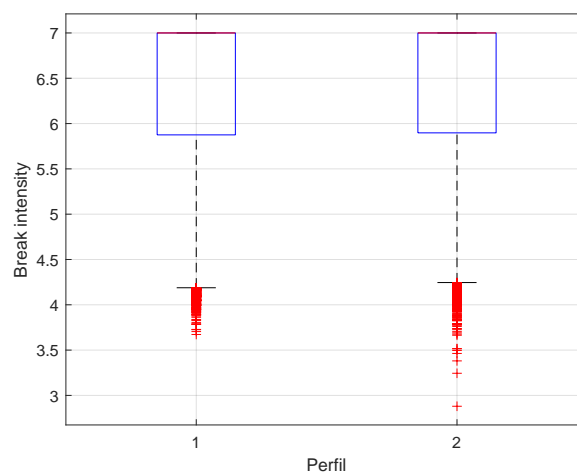


Figura 5.30 Distribución de la intensidad de rotura en el estado previo.

Por tanto, valores altos de Y corresponden con intensidades de rotura bajas, y valores bajos de Y corresponden con intensidades de rotura altas o extremas.

En la Figura 5.30 se muestra una distribución de la intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Se puede observar una tendencia clara de intensidades de rotura *Bajas*, lo que se confirma al observar las Figuras 5.31 y 5.32, en las que se muestran los resultados obtenidos a lo largo de la serie histórica de datos. Estos resultados concuerdan con los obtenidos para el peel angle (valores muy altos), resultando el estado previo principalmente en oleajes para surfistas poco experimentados, por lo que aunque se tengan unos valores de operatividad aceptables resultan en maniobras muy básicas de surf.

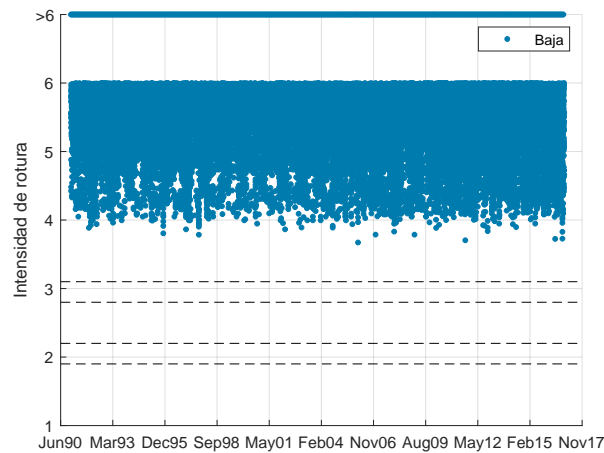


Figura 5.31 Intensidad de rotura a lo largo de la serie histórica (Estado previo). Perfil 1.

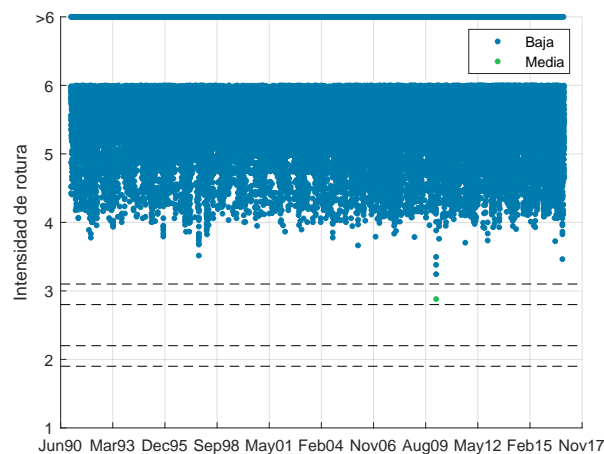


Figura 5.32 Intensidad de rotura a lo largo de la serie histórica (Estado previo). Perfil 2.

5.2.5 Operatividad

Se calcula la operatividad en el estado 0 (sin arrecife), mostrándose en la Figura 5.33, y se compara con la situación con arrecife (Figura 5.34). Se observa una operatividad mucho mayor en el estado con arrecife, siendo casi el doble el número de días al año en que se tienen estados de mar surfeables. Por tanto, se confirma la suposición de que la presencia del arrecife aumentaría la operatividad, siendo por tanto positiva su construcción, favoreciendo la práctica de surf.

5.3 Simulación unidimensional con vegetación

Como ya se ha comentado, se ha realizado una simulación en 1D, teniendo en cuenta el efecto de disipación que produce la vegetación. Con este objetivo, se tapiza por completo el arrecife con una vegetación de las características mostradas en la Tabla 3.5. El resultado

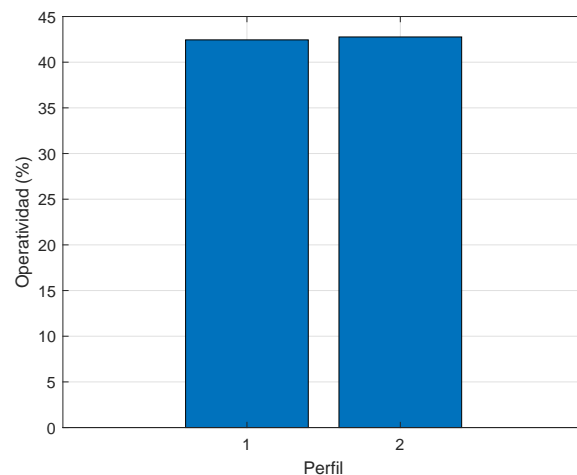


Figura 5.33 Operatividad en el estado previo.

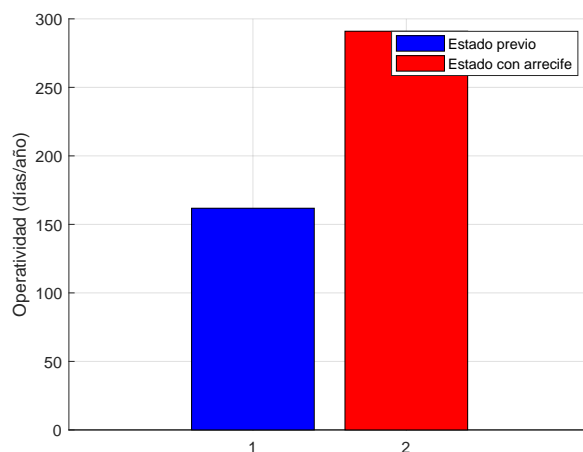


Figura 5.34 Comparación de la operatividad con y sin arrecife.

esperado es un aumento del porcentaje de rotura del oleaje, debido al incremento de la fricción con el fondo.

5.3.1 Porcentaje de rotura

En la Figura 5.35 se muestra el porcentaje de rotura del oleaje a lo largo de la vida útil del arrecife. Se observa un porcentaje del 30-40 % de rotura en los perfiles 5 y 6, un porcentaje del 20-30 % en los perfiles 16 y 17; y un porcentaje mucho mayor, alrededor al 90 %, para los perfiles 9 y 10. Esto es debido a la geometría de estos perfiles (ver Figura 4.13). Se puede observar que esta pareja de perfiles, situados en la punta del arrecife, tiene una diferencia de altura mucho mayor del arrecife con respecto al fondo (4 m de diferencia) que los perfiles situados en las aspas del mismo (2 m de diferencia). Esto hace que el cambio sea mucho más brusco, y por tanto, favoreciendo la rotura del oleaje. Los porcentajes de rotura obtenidos con vegetación son similares a los obtenidos sin vegetación.

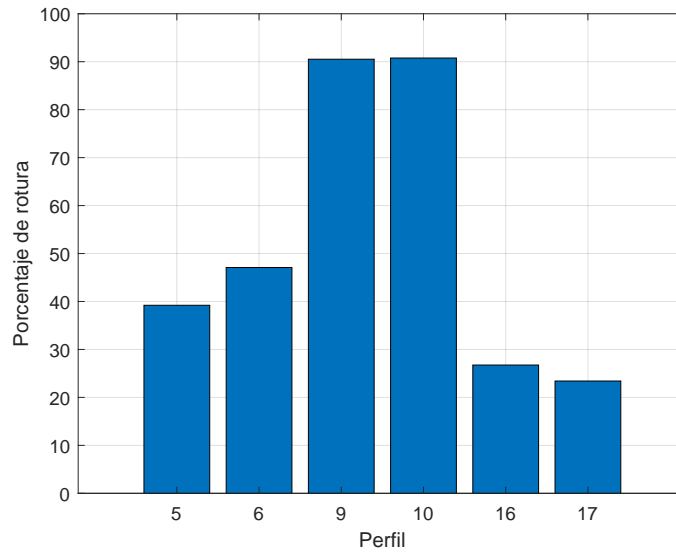


Figura 5.35 Porcentaje de rotura del oleaje. Caso con vegetación.

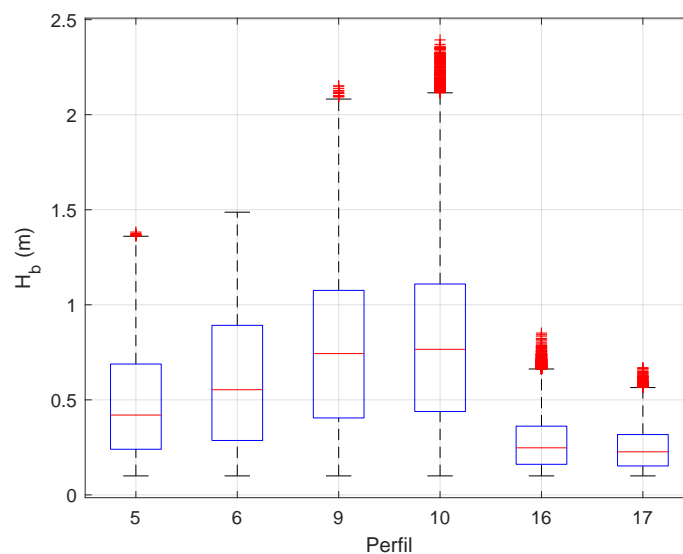


Figura 5.36 Distribución de la altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife.

5.3.2 Altura de ola en rotura

En cuanto a la altura de ola en rotura, se muestra en la Figura 5.36 los resultados obtenidos.

De la gráfica se puede deducir que los valores más probables de altura de ola en rotura se encuentran por debajo de 1 m. Es importante recordar que alturas muy bajas implican que es necesario ser un surfista más experimentado para poder surfear la ola. Como se puede observar, el perfil con mayores valores de altura en rotura es el 10, seguido por el 9, siendo los perfiles 5, 6, 16 y 17 los de menor altura, concordando con los resultados de porcentaje de rotura mostrados anteriormente. Es destacable comentar que las mayores alturas de ola en rotura se producen en los perfiles situados en la punta del arrecife.

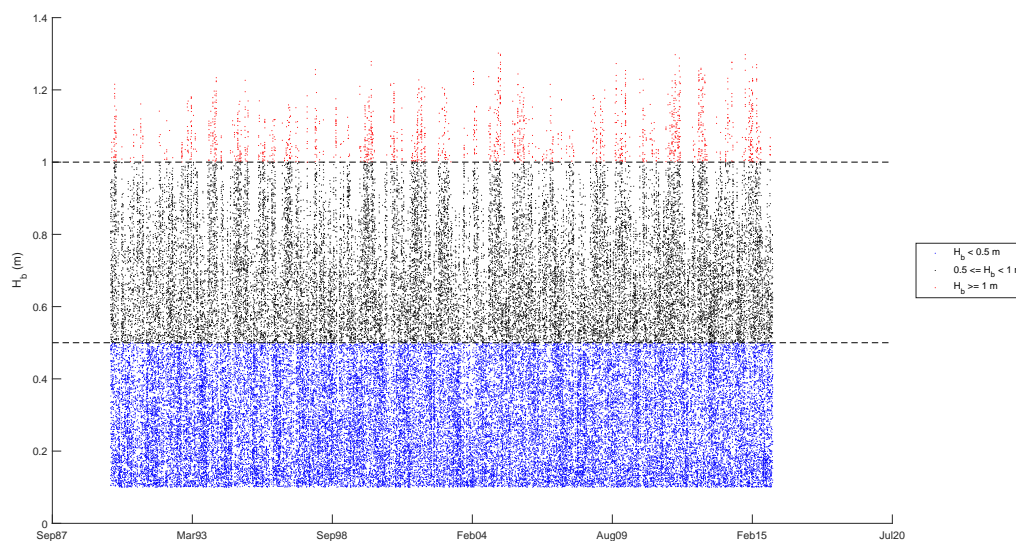


Figura 5.37 Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 5.

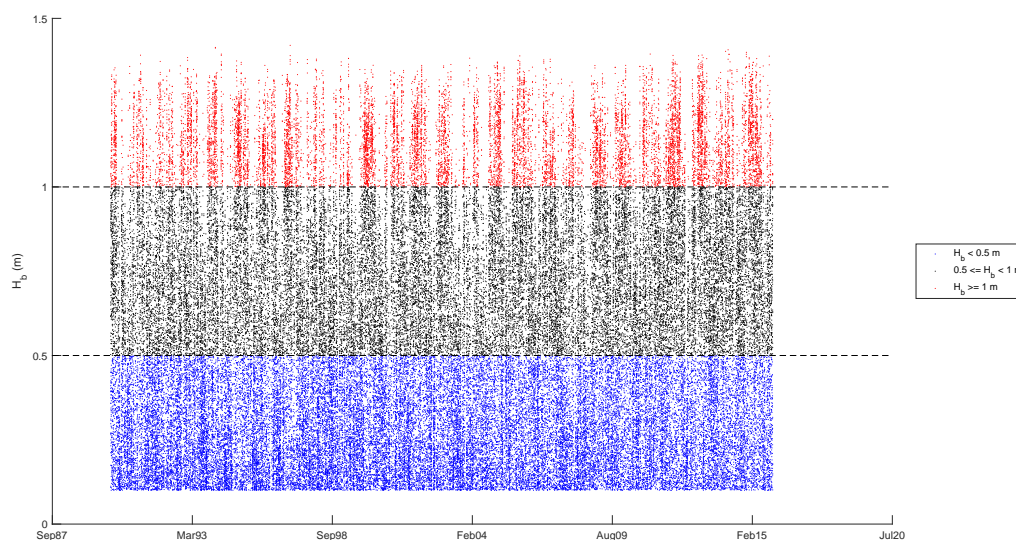


Figura 5.38 Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 6.

En las Figuras 5.37 a 5.42 se puede observar de manera muy visual la altura de ola en rotura en los perfiles a lo largo de toda la serie histórica de datos.

Si comparamos los resultados obtenidos con los obtenidos en las simulaciones sin vegetación (Figura 5.2), se obtienen alturas de ola en rotura menores en el estado con vegetación. Es decir, la disipación que produce la vegetación produce una reducción de la altura de ola en rotura, aunque no en gran magnitud, tal y como se observa en la Figura 5.43, en la que

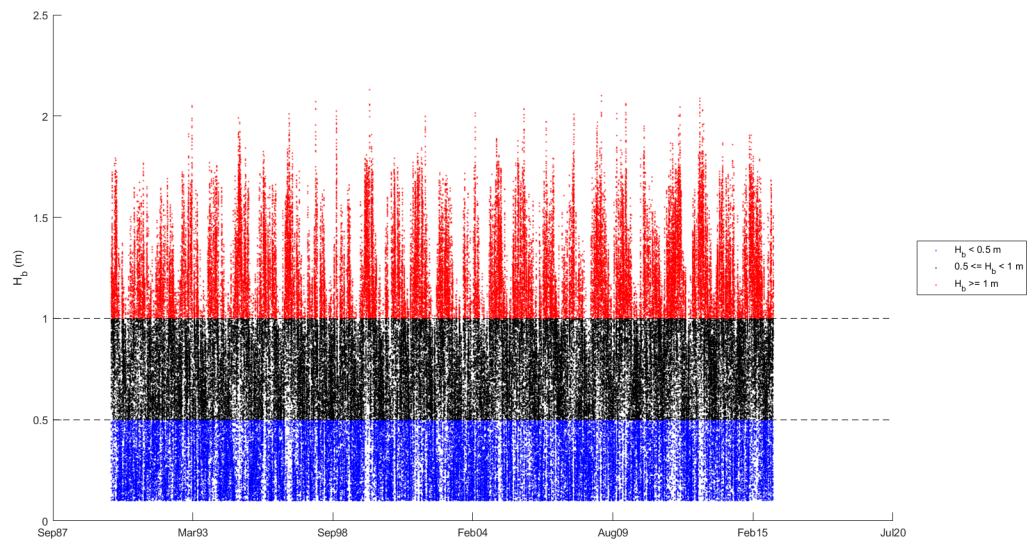


Figura 5.39 Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 9.

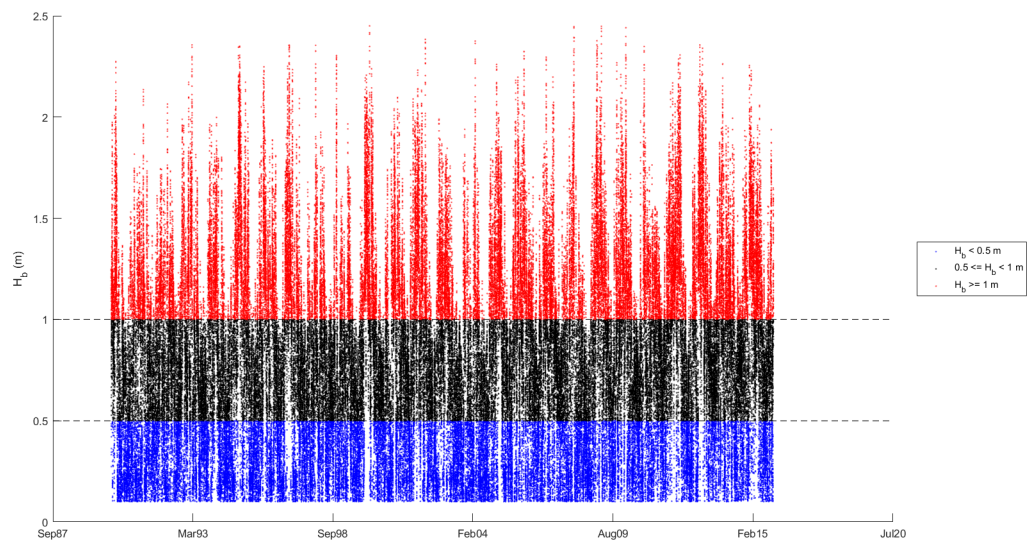


Figura 5.40 Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 10.

se muestra la altura de ola en rotura a lo largo de toda la serie histórica de datos, para el caso con vegetación y para el caso sin vegetación.

5.3.3 Peel angle

En cuanto al peel angle, los resultados obtenidos se muestran en las figuras 5.44 a 5.46, donde se representa el histograma de frecuencias del peel angle. Este puede tomar valores

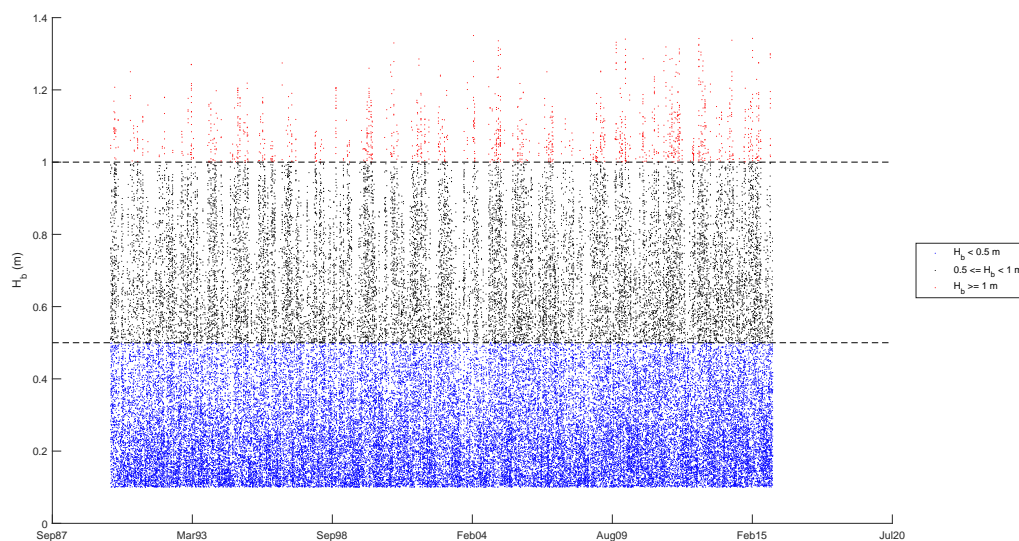


Figura 5.41 Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 16.

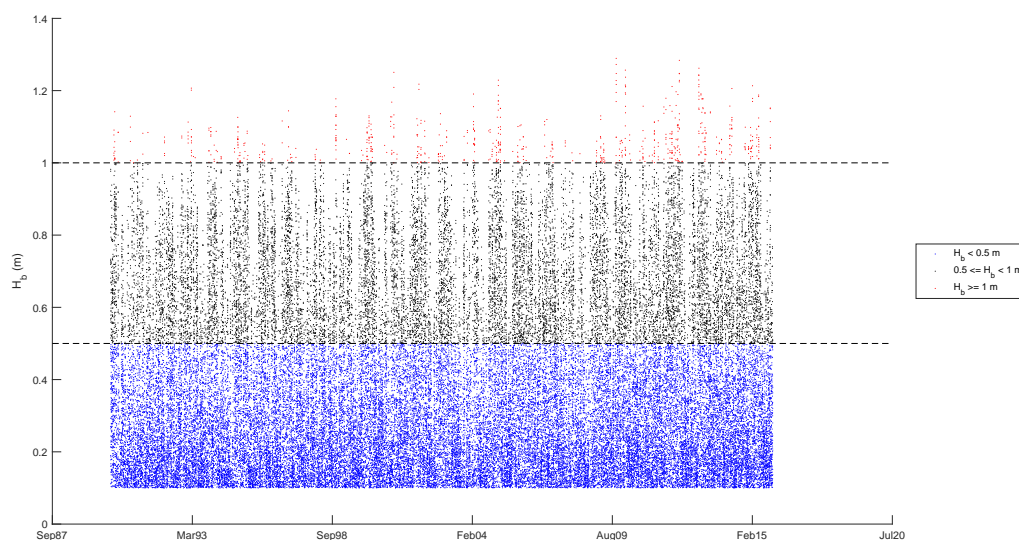


Figura 5.42 Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 17.

de 0 a 90°, y para la representación se ha dividido en los rangos de peel angle que limitan el nivel del surfista (ver Tabla 3.3). Los perfiles 5-6 y 9-10 son los que tienen una mejor distribución del peel angle, estando accesible la práctica del surf para más niveles. En cambio, la pareja de perfiles 16-17 concentra gran parte de los valores en un único rango (0-27°), que además son valores bajos, lo que requiere niveles de alta experiencia para la práctica del surf.

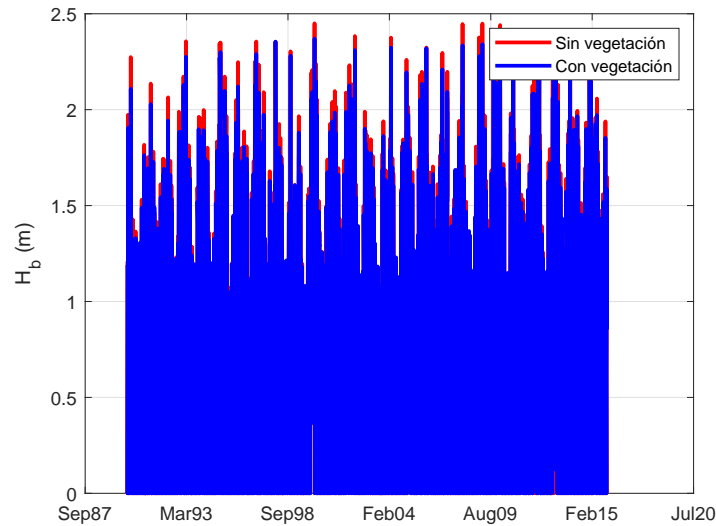


Figura 5.43 Comparación de la altura de ola en rotura con y sin vegetación.

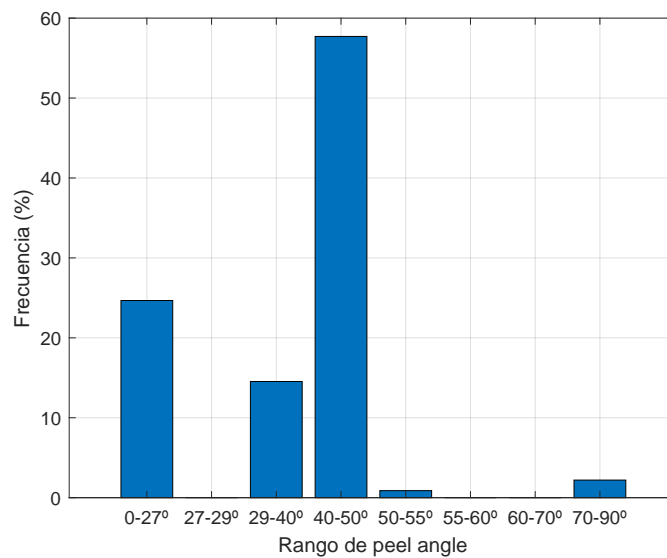


Figura 5.44 Distribución del peel angle perfiles 5-6. Caso con vegetación.

5.3.4 Intensidad de rotura

En cuanto a la intensidad de rotura, como ya se ha comentado, es un parámetro fundamental, y cuanto mayor sea mayor experiencia debe tener el surfista. Recordando, la intensidad de rotura se calcula como:

$$Y = 0.065X + 0.821 \quad (5.3)$$

Por tanto, valores altos de Y corresponden con intensidades de rotura bajas, y valores bajos de Y corresponden con intensidades de rotura altas o extremas.

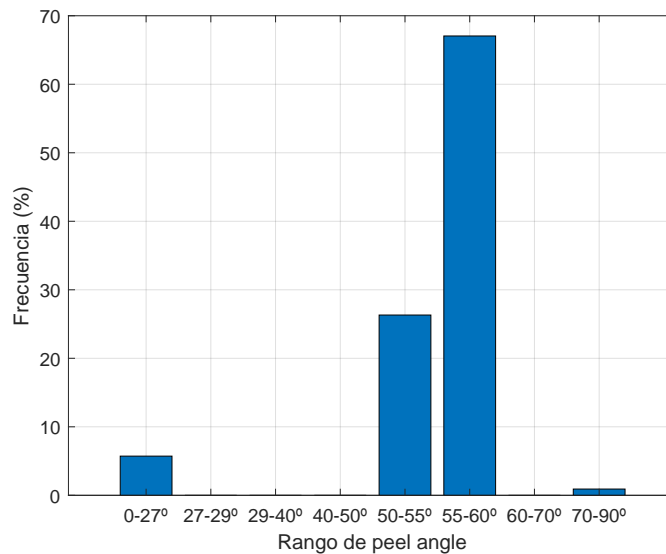


Figura 5.45 Distribución del peel angle perfiles 9-10. Caso con vegetación.

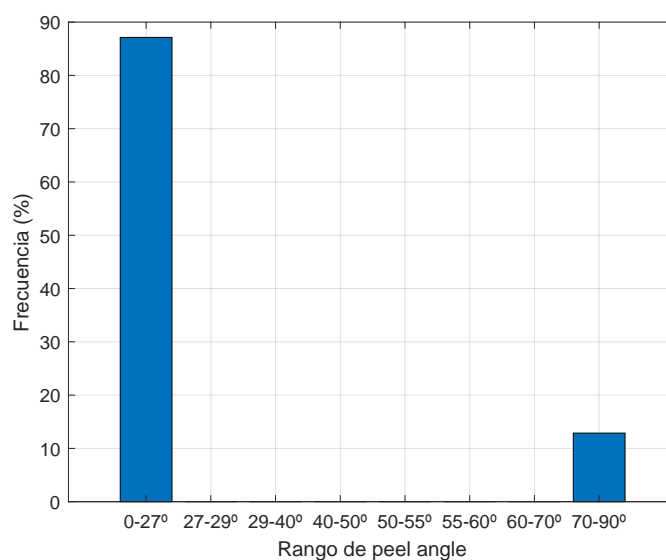


Figura 5.46 Distribución del peel angle perfiles 16-17. Caso con vegetación.

En las Figuras 5.47 a 5.52 se muestran los histogramas de la intensidad de rotura para cada perfil. En los perfiles 5 y 6 los valores de intensidad de rotura se concentran principalmente en valores *Extremos*, lo que requiere niveles de surfista muy experimentados. En cambio, los perfiles 9 y 10 tienen valores más distribuidos de intensidad de rotura, permitiendo la práctica del surf a otros niveles de surfista. Los perfiles 16 y 17 tienen los valores de intensidad de rotura concentrados en un único rango, siendo las intensidades *Media* y *Baja*, respectivamente, lo que no requiere surfistas muy experimentados para la práctica del surf.

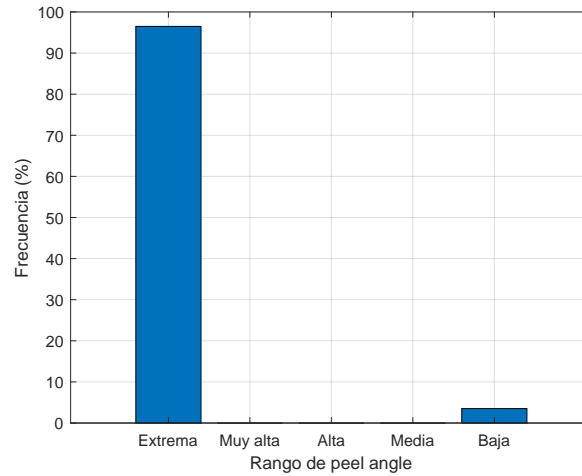


Figura 5.47 Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife con vegetación. Perfil 5.

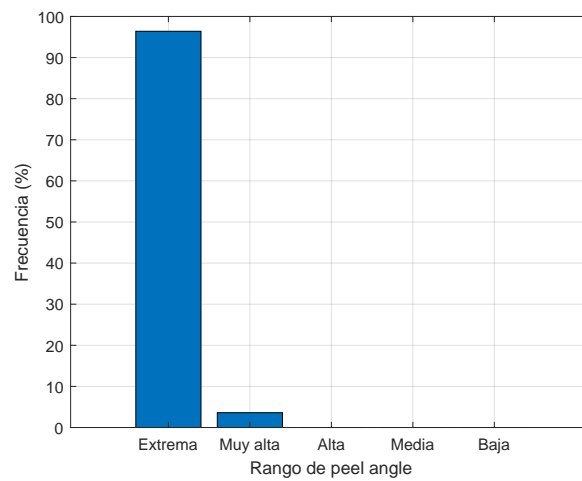


Figura 5.48 Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife con vegetación. Perfil 6.

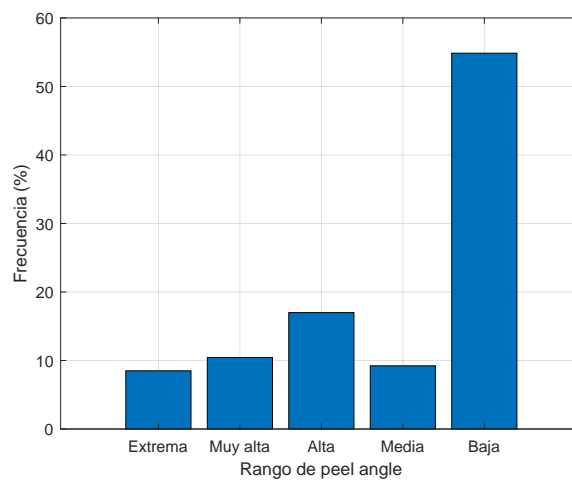


Figura 5.49 Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife con vegetación. Perfil 9.

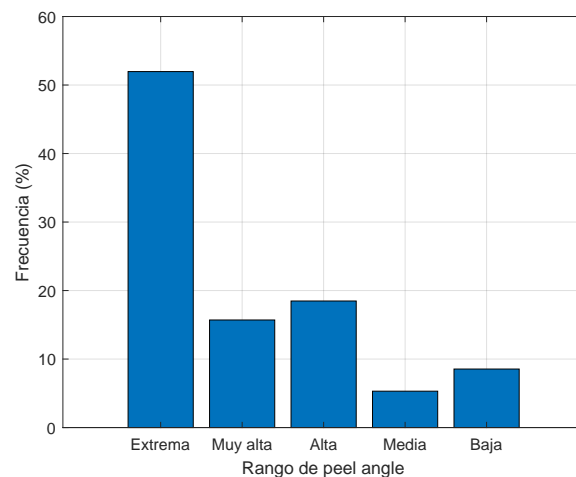


Figura 5.50 Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife con vegetación. Perfil 10.

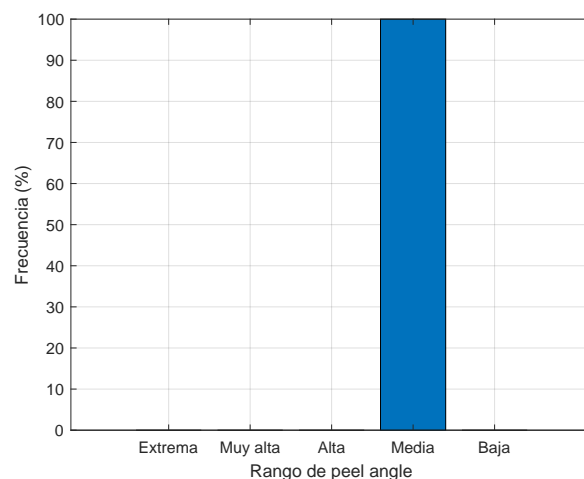


Figura 5.51 Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife con vegetación. Perfil 16.

5.3.5 Operatividad

Se ha calculado la operatividad del arrecife. Como ya se ha comentado, para que sea operativo, se deben cumplir dos condiciones, que exista rotura del oleaje y que la altura de ola en rotura sea mayor a 0.3 m. En la Figura 5.53 se muestran los resultados de operatividad obtenidos. Se observan altos valores de operatividad (80 %) en la punta del arrecife (perfiles 9 y 10), mientras que en las aspas se observan menores valores de operatividad, menor en el aspa sur (perfiles 16 y 17) que en el aspa norte. El hecho de que en la punta la operatividad sea mayor es debido a la geometría de estos perfiles (ver Figura 4.13). Se puede observar que esta pareja de perfiles, situados en la punta del arrecife, tiene una diferencia de altura mucho mayor del arrecife con respecto al fondo (4 m de diferencia) que los perfiles situados en las aspas del mismo (2 m de diferencia). Esto hace que el cambio sea mucho más brusco, y por tanto, favoreciendo la rotura del oleaje.

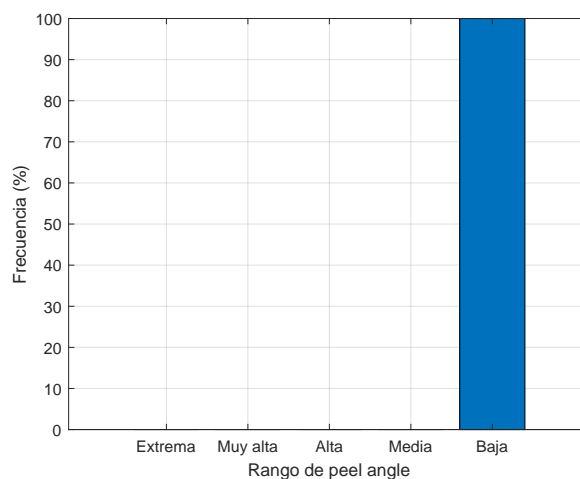


Figura 5.52 Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife con vegetación. Perfil 17.

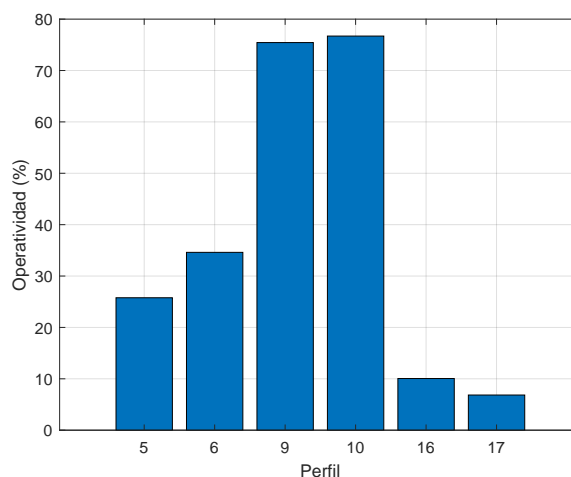


Figura 5.53 Operatividad en el arrecife con vegetación.

Por último, si comparamos la operatividad del arrecife (considerando el mayor valor), con y sin vegetación (Figura 5.54), se observa que la operatividad no ha variado con la inclusión de la vegetación.

5.4 Simulación bidimensional

Como ya se ha comentado, se ha realizado una simulación bidimensional, con las características comentadas en la sección 3.7. En la Figura 5.55 se muestra un mapa de colores que representa la altura de ola en todo el contorno de simulación para un estado de mar seleccionado, en este caso, 2.3 m de altura de ola, 11.1 s de período de pico y 265° de dirección de procedencia (oeste). En los resultados se pueden observar ciertas deficiencias en el modelo, como una altura de ola muy elevada en el contorno que no se propaga bien hacia el interior, además de grandes diferencias de altura entre la primera fila de celdas y

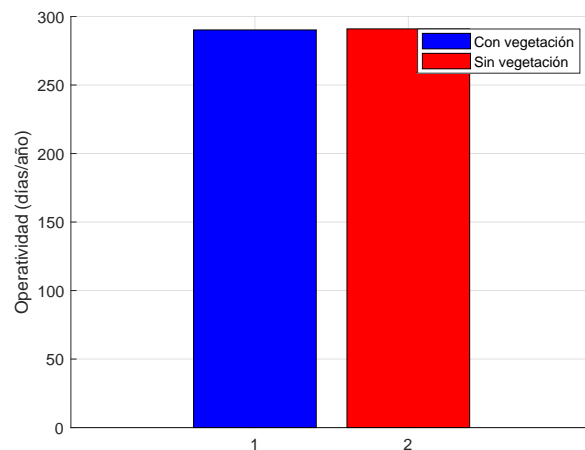


Figura 5.54 Comparación de la operatividad con y sin vegetación.

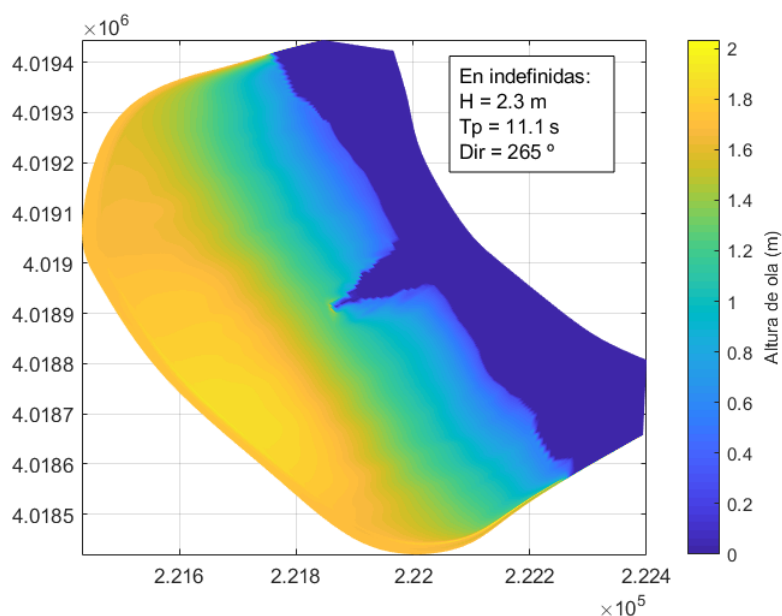


Figura 5.55 Altura de ola resultado del modelo bidimensional para estado de mar concreto.

las siguientes.

Además, se ha realizado una comparación de los resultados obtenidos con el modelo bidimensional con los obtenidos con el unidimensional. Para ello, se ha calculado la diferencia relativa de la altura de ola en rotura unidimensional con respecto a la bidimensional, según la Ecuación 5.4. Los resultados obtenidos de dicha comparación se muestran en la Figura 5.56. Se muestran diferencias exorbitantemente grandes, valores inadmisibles dado que la diferencia entre los modelos 1D y 2D no debe ser tanta. Por ello, y vistas las deficiencias del modelo 2D comentadas anteriormente, se desechan los resultados del modelo bidimensional, dado que una puesta a punto del mismo queda fuera del alcance del presente Trabajo

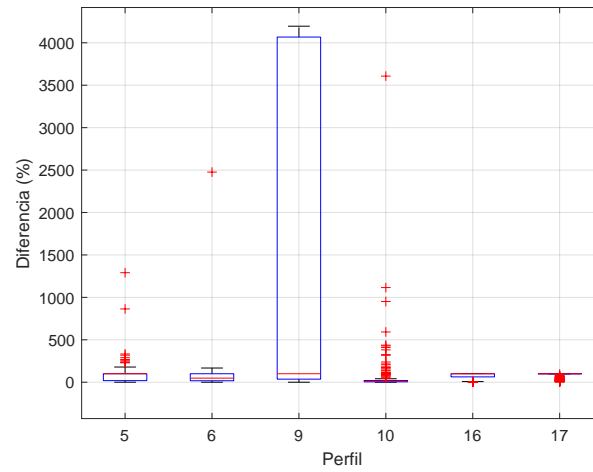


Figura 5.56 Comparación de la altura de ola en rotura de los modelos 1D y 2D.

Fin de Máster.

$$\varepsilon(\%) = \frac{|H_{1D} - H_{2D}|}{H_{2D}} * 100 \quad (5.4)$$

6 Conclusiones y trabajo futuro

Tras el análisis realizado de los resultados obtenidos, se obtienen las siguientes conclusiones del trabajo:

- Ha sido necesario modificar la geometría original del arrecife para poder conseguir unos valores de operatividad aceptables. Además, se considera que la metodología seguida para optimizar la geometría ha sido adecuada.
- Con la nueva geometría, se consiguen valores bastante buenos de operatividad, siendo esta mucho mayor en la punta que en las aspas, debido a la geometría de los perfiles. Considerando la operatividad global del arrecife la mayor de todos los perfiles, se consigue que haya cerca de 300 días al año operativos.
- En el estado inicial (alternativa sin arrecife), la operatividad es mucho menor (aproximadamente 150 días al año), aunque es aceptable teniendo en cuenta que es en condiciones naturales. Sin embargo, la construcción del arrecife mejoraría ostensiblemente la situación.
- En la alternativa con arrecife, se consigue que la práctica del surf sea apta para todos los niveles, dado que los resultados de los parámetros estudiados están bien distribuidos en todos los rangos, desde niveles bajos hasta experimentados.
- En cambio, en el estado inicial, los resultados de los parámetros estudiados se encuentran muy concentrados en ciertos rangos, y establecen que la mayoría de los días surfeables se tengan olas que no requieren gran experimentación por parte de los surfistas. Esto, aunque hace que la práctica del surf en la zona sea accesible a más gente, sólo permitiría realizar maniobras básicas, alejando a los surfistas más experimentados.
- La vegetación incluida tiene cierta influencia en los parámetros de surf, pero no varía la operatividad del arrecife, y la altura de ola en rotura se reduce con muy poca magnitud. Los parámetros de surf que varían fundamentalmente son el peel angle y la intensidad de rotura.
- El modelo bidimensional realizado no se encuentra lo suficientemente calibrado y optimizado, por lo que los resultados del modelo bidimensional obtenidos no se consideran válidos.

En cuanto al trabajo futuro, este trabajo podría continuarse realizando una adecuada calibración y modelado de las simulaciones bidimensionales con *XBeach*, con las cuales se

podrán obtener resultados mucho más precisos, sin embargo dada la complejidad que tiene su preparación se escapaba del alcance del presente Trabajo Fin de Máster.

Además, se podría evaluar la alternativa sin arrecife con la presencia de vegetación en la playa, con el objetivo de evaluar una posible alternativa para aumentar la operatividad, diferente al arrecife y menos drástica con el medio ambiente.

Por último, se podrían evaluar distintos tipos de vegetación con los que tapizar el arrecife, con el objetivo de mejorar la operatividad cambiando las características de la vegetación utilizada.

Índice de Figuras

2.1	Situación de la zona de estudio	3
2.2	Batimetría de la zona de estudio (I)	4
2.3	Batimetría de la zona de estudio (II)	5
2.4	Criterio del sistema de direcciones de oleaje	5
2.5	Situación del punto SIMAR	7
2.6	Rosa de oleaje	7
2.7	Serie temporal de altura de ola significativa	8
2.8	Histograma de altura de ola	8
2.9	Histograma de período de pico	8
2.10	Dispersión $H_s - T_p$	9
2.11	Dispersión H_s -Dirección	9
2.12	Función de densidad tipo Weibull para el régimen medio de altura de ola	10
2.13	Función de distribución tipo Weibull para el régimen medio de altura de ola	11
2.14	Picos de altura de ola sobre umbral con $H_{su} = 3.4m$	12
2.15	Función de densidad tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola	12
2.16	Función de distribución tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola	13
2.17	Rosa de viento	14
2.18	Serie temporal de velocidad del viento	14
2.19	Histograma de velocidad del viento	15
2.20	Dispersión Velocidad-Dirección	15
2.21	Función de densidad tipo Weibull para el régimen medio de velocidad del viento	16
2.22	Función de distribución tipo Weibull para el régimen medio de velocidad del viento	17
2.23	Picos de velocidad del viento sobre umbral con $Vel_u = 16m/s$	17
2.24	Función de densidad tipo GEV para el régimen extremal de velocidad del viento	18
2.25	Función de distribución tipo GEV para el régimen extremal de velocidad del tiempo	19
2.26	Situación del punto REDMAR	19
2.27	Serie temporal de niveles de marea	20
3.1	Tipos de rotura	30
3.2	Partes del arrecife	32
3.3	Perfiles de referencia	32
3.4	Perfiles de referencia	33
3.5	Batimetría en los perfiles	33
3.6	Malla de cálculo	34

3.7	Perfiles de cálculo en la situación previa	35
3.8	Ajuste del parámetro de rotura	35
4.1	Modificaciones perfil 5	38
4.2	Modificaciones perfil 6	39
4.3	Modificaciones perfil 9	39
4.4	Modificaciones perfil 10	40
4.5	Modificaciones perfil 16	40
4.6	Modificaciones perfil 17	41
4.7	Evaluación de la rotura en los perfiles de prueba (I)	41
4.8	Evaluación de la rotura en los perfiles de prueba (II)	41
4.9	Cálculo del peel angle	42
4.10	Peel angle perfiles 5 y 6	42
4.11	Peel angle perfiles 9 y 10	42
4.12	Peel angle perfiles 16 y 17	43
4.13	Geometría definitiva perfiles 5 y 6	43
4.14	Geometría definitiva perfiles 9 y 10	43
4.15	Geometría definitiva perfiles 16 y 17	44
5.1	Porcentaje de rotura del oleaje en la vida útil del arrecife	48
5.2	Distribución de la altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife	49
5.3	Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 5	49
5.4	Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 6	50
5.5	Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 9	50
5.6	Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 10	51
5.7	Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 16	51
5.8	Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 17	52
5.9	Distribución del peel angle a lo largo de la vida útil del arrecife	52
5.10	Distribución del peel angle perfiles 5-6	53
5.11	Distribución del peel angle perfiles 9-10	53
5.12	Distribución del peel angle perfiles 16-17	54
5.13	Distribución de la intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife	54
5.14	Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 5	55
5.15	Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 6	55
5.16	Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 9	55
5.17	Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 10	56
5.18	Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 16	56
5.19	Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 17	56
5.20	Operatividad en el arrecife	57
5.21	Operatividad en el arrecife	57
5.22	Operatividad en el arrecife por estación	58
5.23	Porcentaje de rotura del oleaje para la serie histórica de datos	58
5.24	Distribución de la altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife	59
5.25	Comparación de la altura de ola en rotura a lo largo de la serie histórica de datos	60
5.26	Altura de ola en rotura en el estado previo. Perfil 1	60
5.27	Altura de ola en rotura en el estado previo. Perfil 2	61
5.28	Distribución del peel angle en el estado previo	61
5.29	Distribución del peel angle en el estado previo	62

5.30	Distribución de la intensidad de rotura en el estado previo	62
5.31	Intensidad de rotura a lo largo de la serie histórica (Estado previo). Perfil 1	63
5.32	Intensidad de rotura a lo largo de la serie histórica (Estado previo). Perfil 2	63
5.33	Operatividad en el estado previo	64
5.34	Comparación de la operatividad con y sin arrecife	64
5.35	Porcentaje de rotura del oleaje. Caso con vegetación	65
5.36	Distribución de la altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife	65
5.37	Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 5	66
5.38	Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 6	66
5.39	Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 9	67
5.40	Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 10	67
5.41	Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 16	68
5.42	Altura de ola en rotura a lo largo de la vida útil del arrecife. Perfil 17	68
5.43	Comparación de la altura de ola en rotura con y sin vegetación	69
5.44	Distribución del peel angle perfiles 5-6. Caso con vegetación	69
5.45	Distribución del peel angle perfiles 9-10. Caso con vegetación	70
5.46	Distribución del peel angle perfiles 16-17. Caso con vegetación	70
5.47	Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife con vegetación. Perfil 5	71
5.48	Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife con vegetación. Perfil 6	71
5.49	Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife con vegetación. Perfil 9	71
5.50	Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife con vegetación. Perfil 10	72
5.51	Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife con vegetación. Perfil 16	72
5.52	Intensidad de rotura a lo largo de la vida útil del arrecife con vegetación. Perfil 17	73
5.53	Operatividad en el arrecife con vegetación	73
5.54	Comparación de la operatividad con y sin vegetación	74
5.55	Altura de ola resultado del modelo bidimensional para estado de mar concreto	74
5.56	Comparación de la altura de ola en rotura de los modelos 1D y 2D	75

Bibliografía

- [1]
- [2] *Xbeach technical reference: Kingsday release.*
- [3] M. Black and S. Mead, *Design of surfing reefs*, (2009).
- [4] Juan Manuel Raffo Caballero, *Optimización de granjas de dispositivos para la extracción de energía del oleaje.*
- [5] P. Camus, F.J. Mendez, R. Medina, and A.S. Cofiño, *Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate*, Coastal Engineering (2011).
- [6] P. Camus, F.J. Mendez, R. Medina, A. Tomas, and C. Izaguirre, *High resolution downscaled ocean waves (dow) reanalysis in coastal areas*, Coastal Engineering (2013).
- [7] W.R. Dally, *Quantifying beach surfeability*, Proc Beach Technology Conference (Tampa, Florida) (1989).
- [8] ———, *Stochastic modelling of surfing climate*, Proceeding The 22nd Coastal Engineering Conference, ASCE (1990).
- [9] J.A. Hutt, *Bathymetry and wave parameters defining the surfing quality of five adjacent reefs*, (1997).
- [10] J.A. Hutt, K.P. Black, and S.T. Mead, *Classification of surf breaks in relation to surfing skills*, Journal Coastal Research (2001).
- [11] Mack I.D., *Quantitative assesment of the surfability of pratte's artificial surfing reef santa monica bay.*
- [12] José María Tortolero Jara, *Diseño y optimización de arrecifes artificiales para la práctica de surf.*
- [13] R.W. Kennard and L.A. Stone, *Computer aided design experiments*, Technometrics (1969).
- [14] S.T. Mead and K.P. Black, *Predicting the breaking intensity of surfing waves*, Journal of Coastal Research (2001).
- [15] Ana et al Mendonça, *Hydrodynamics around an artificial surfing reef at leirosa, portugal*, Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering (2012).

- [16] M. Neves, *Artificial surfing reefs: The preparation of physical tests and the theory behind*, (2006).
- [17] D.A. Patrick and R.L. Wiegel, *Amphibian tractors in the surf; proceedings of first conference on ships and waves*, The Engineering Foundation Council on Waves Research (1954).
- [18] B.G. Ruessink, G. Ramaekers, and L.C. Van Rijn, *On the parameterization of the free-stream non-linear wave orbital motion in nearshore morphodynamic models*, Coastal Engineering (2012).
- [19] B.E. et al Scarfe, *The science of surfing waves and surfing breakes*, (2003).
- [20] J.R Walker and R.Q. Palmer, *Recreational surfing on hawaiian reefs*, Proceeding 13th Coastal Engineering Conference, 1972. Vanouwer, B.C., Canada (1972).